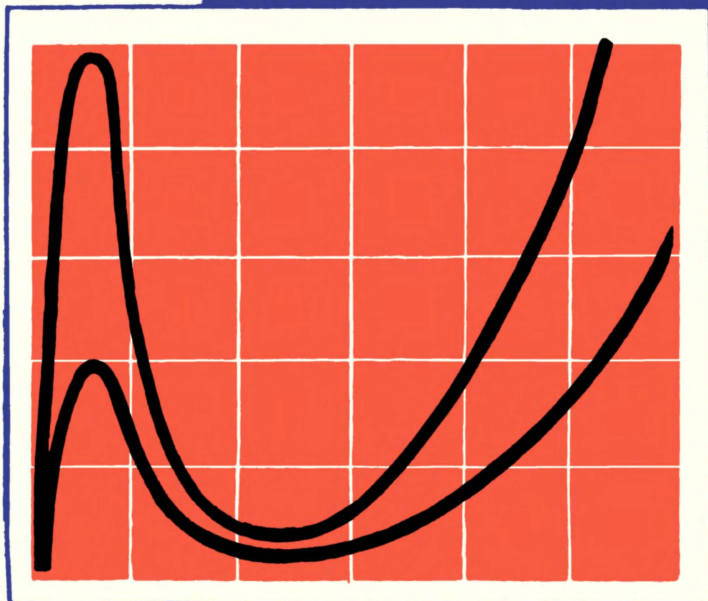




В. В. СМЕРНОВ



**генераторы
на туннельных
диодах**



МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 781

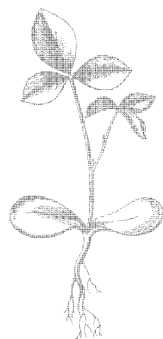
В. В. СМЕРНОВ

ГЕНЕРАТОРЫ
НА ТУННЕЛЬНЫХ
ДИОДАХ
(практические схемы)



«ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1971



Scan AAW

6Ф0.32
С 50
УДК 621.373

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Берг А. И., Борисов В. Г., Бурдейный Ф. И., Бурлянд В. А.,
Ванеев В. И., Геништа Е. Н., Жеребцов И. П., Канаева А. М.,
Корольков В. Г., Кренкель Э. Т., Куликовский А. А., Смирнов А. Д.,
Тарасов Ф. И., Шамшур В. И.

Смирнов В. В.

С 50 Генераторы на туннельных диодах (практические
схемы). М., «Энергия», 1971.

48 стр. с ил. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 781).

Рассматриваются особенности и основные характеристики импульсных генераторов с емкостью и индуктивностью на арсенид-галлиевых туннельных диодах. Приведены принципиальные схемы конкретных устройств, использующих эти генераторы (пробники, генераторы длинных и коротких импульсов, испытатели и др.).

Книга рассчитана на подготовленных радиолюбителей, а также может быть полезна техникам, занимающимся разработкой контрольно-измерительной аппаратуры.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемая вниманию читателей книга является уже четвертой в серии книг, вышедших в «Массовой радиобиблиотеке» и посвященных применению новых полупроводниковых приборов — туннельных диодов. Уникальные свойства этих приборов — наличие участка с отрицательным сопротивлением, быстроедействие, экономичность, независимость сопротивления от частоты и пр. — позволяют по праву причислить туннельные диоды к наиболее перспективным электронным приборам, созданным после транзисторов.

Однако, несмотря на большой размах работ в области применения туннельных диодов в радио- и вычислительной технике, сфера их широкого практического использования ограничивается пока в основном лишь введением туннельных диодов в логические устройства, в схемы триггеров, пороговых устройств и усилителей. Еще более ограниченное применение находят туннельные диоды в радиолюбительской практике. Между тем применение генераторных устройств с туннельными диодами позволяет довольно легко построить ряд оригинальных малогабаритных и эффективных измерительных приборов.

В этой книге автор описал несколько практических схем генераторов на туннельных диодах, большинство из которых собрано и опробовано им самим. В силу многих обстоятельств автором не рассмотрены вопросы применения диодов в СВЧ-устройствах, стабилизации генераторных устройств, применения схем преобразователей напряжения, смесителей и т. п.

Автор с благодарностью примет все замечания и пожелания по книге, которые следует направлять по адресу: Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10. Редакции Массовой радиобиблиотеки.

В. Смирнов

Глава первая

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДАХ

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДОВ

Туннельные диоды изготавливают из высоколегированных полупроводниковых материалов с большим, по сравнению с обычным диодом, содержанием примесей (порядка 10^{19} — 10^{20} атом/см³). Диоды типа 1И302, например, изготавливают путем сплавления монокристалла германия, легированного мышьяком, с индием, легированным галлием. Арсенид-галлиевые диоды типа АИ301 (ЗИ301) легируются оловом.

Туннельный эффект диодов обусловлен именно богатым содержанием примесей и узкостью p - n перехода диода (порядка ста ангстрем). Вольт-амперная характеристика туннельного диода (рис. 1) вследствие наличия двух механизмов прохождения электронов через p - n переход — туннельного и диффузионного — имеет два восходящих участка и участок отрицательного сопротивления.

На характеристике имеется ряд характерных точек, координаты которых принято называть статистическими параметрами туннельного диода. Наиболее важные из них следующие: ток максимума I_1 — ток, соответствующий максимуму на вольт-амперной характеристике; напряжение максимума U_1 ; ток минимума I_2 ; напряжение минимума U_2 ; наибольшее напряжение переключения U_3 — напряжение, соответствующее току максимума на второй восходящей (диффузионной) ветви характеристики. Обычно точку с координатами I_1 , U_1 называют вершиной характеристики, точку с координатами I_2 , U_2 — впадиной.

К характерным параметрам туннельного диода относятся также максимальное напряжение переключения при переходе с первой восходящей (туннельной) ветви на вторую или напряжение раствора характеристики $\Delta U = U_3 - U_1$; отношение токов I_1/I_2 ; модуль дифференциального сопротивления диода $|r_d| = dU/dI$.

Маломощные переключаемые туннельные диоды выполняются обычно в виде керамического цилиндра (рис. 2), к которому крепятся коваровые фланцы с контактными полосками.

Основные технические характеристики арсенид-галлиевых переключаемых диодов серии АИ301 приведены в табл. 1*.

* Электрические характеристики диодов серии ЗИ301 совершенно идентичны характеристикам диодов АИ301, выпускаемых в настоящее время.

Далее в тексте и на рисунках будут указаны те марки диодов, которые они носили в момент установки их в прибор.

Таблица 1

Тип диода	I_1 , ма, при температуре $20 \pm 10^\circ \text{C}$	I_1 , ма, при температуре $-50 \div +70^\circ \text{C}$	$U_{1\text{макс}}$, в	U_2 , в	Емкость диода, пф
АИЗ01А	$2 \pm 0,4$	$1,3-2,6$	0,18	$\geq 0,65$	< 12
АИЗ01Б	$5 \pm 0,5$	$3,8-5,9$	0,18	$0,85-1,15$	~ 25
АИЗ01В	$5 \pm 0,5$	$3,8-5,9$	0,18	$1,0-1,3$	~ 25
АИЗ01Г	10 ± 1	$7,5-11,8$	0,18	$\geq 0,8$	< 50

Общими параметрами диодов серии АИЗ01 являются напряженные раствора характеристики ΔU — не менее 0,65 в; кратность токов I_1/I_2 — не менее 8; емкость корпуса — менее 0,8 пф; индуктивность корпуса — менее 1,5 нгн; вес диода 0,15 г; долговечность —

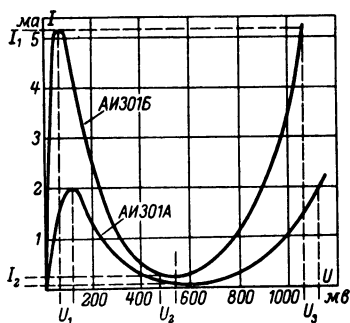


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики туннельных диодов различных типов.

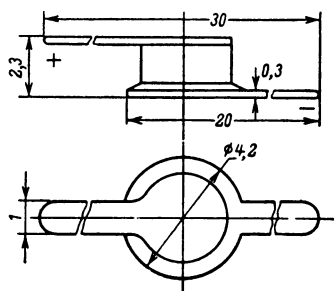


Рис. 2. Внешний вид туннельного диода типа АИЗ01.

более 5000 ч. Эксплуатационные окружающие условия: температура — от -60 до $+70^\circ \text{C}$; влажность — до 98%; давление — от 5 мм рт. ст. до 3 ат.

Большинство характеристик туннельных диодов в отличие от других полупроводниковых приборов слабо зависит от температуры. Относительное изменение координат характерных точек вольт-амперной характеристики диодов типа АИЗ01 в процентном выражении на каждый градус отклонения окружающей температуры от нормальной ($+20^\circ \text{C}$) в диапазоне $0-50^\circ \text{C}$ составляет для $I_1 \pm (0,05-0,1)$; для I_2 $0,1 \div 0,3$; для U_1 $0,03 \div 0,1$; для U_2 $0,1 \div 0,3$ и для U_3 $0,15 \div 0,25$.

КОНТРОЛЬ СТАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДОВ

Во многих случаях при разработке схем с туннельными диодами достаточно знать координаты не всех точек вольт-амперной характеристики, а лишь характерные статические параметры характеристики. Если же необходимо определить принадлежность диода

к той или иной группе, то достаточно измерить только ток максимума I_1 .

Определение характера повреждения туннельного диода (обрыв или короткое замыкание) можно производить с помощью ламповых омметров. При работе с омметром прибора А4М2 (ВК7-3) сопротивление исправного диода в прямом направлении составляет 50—100, а в обратном — 5—7 *ом*. Пользоваться обычными тестерами (ТТ-1, АВО-5 и т. п.) для проверки туннельных диодов не следует, так как это может привести к выходу из строя исправных диодов из-за перегрузки по току.

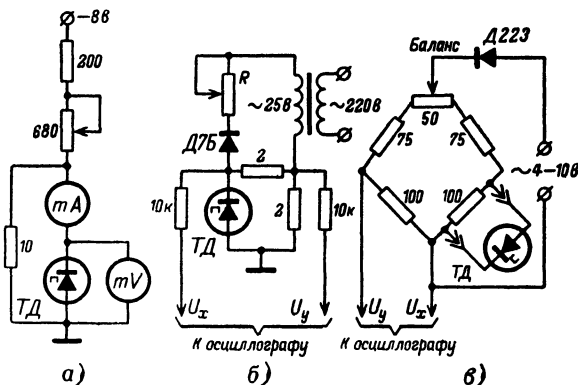


Рис. 3. Схемы испытателей туннельных диодов.

Для снятия статических вольт-амперных характеристик, которое проводится, когда усредненных справочных данных недостаточно, можно воспользоваться схемой на рис. 3,а, с помощью которой можно снять характеристики по точкам. В качестве милливольтметра желательно использовать высокоомный прибор со шкалой не менее 1 *в*. Миллиамперметр должен обеспечивать измерение токов от 0,1 до 10 *ма*. Плавно повышая напряжение на туннельном диоде до предельного на диффузионной ветви и уменьшая его до нуля, регистрируют показания приборов и по ним строят полную кривую.

Менее трудоемко и достаточно точно можно снять характеристики с помощью характериографов. На рис. 3,б приведена схема простого характериографа, выполненного в виде приставки к осциллографу. На усилитель горизонтального отклонения подается напряжение с туннельного диода, на усилитель вертикального отклонения — напряжение с резистора сопротивлением 2 *ом*, пропорциональное току через туннельный диод.

При работе со схемами на рис. 3,а и б весьма вероятно появление автоколебаний из-за паразитных емкостей и индуктивностей схемы, что сопровождается появлением на осциллограмме в районе участка отрицательного сопротивления характерных волнообразных линий.

Этот недостаток слабее проявляется в характериографах, собранных по мостовой схеме (рис. 3,в). Питание приставки осуще-

ствляется от генератора синусоидального напряжения с регулируемой амплитудой на низкоомном выходе или от сетевого трансформатора с вторичным напряжением 4—10 в. Такая приставка пригодна также для снятия вольт-амперных характеристик различных полупроводниковых приборов (диоды, транзисторы, стабилитроны и др.). При проведении калибровки приставки необходимо получить расчетные соотношения для перехода от измеряемых значений напряжения в вертикальном канале U_y к значениям тока через диод.

Поскольку сопротивление остальных плеч моста одинаковы, искомая формула для перехода имеет вид:

$$I_x = 2U_y/R.$$

Здесь R — сопротивления резисторов в плечах моста. Так как по схеме $R=100$ ом, выражение упрощается:

$$I_x = 0,02U_y,$$

где ток выражается в миллиамперах, а напряжение — в милливольт-тах.

Еще одна схема испытателя туннельных диодов будет описана в гл. 3.

МОНТАЖ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДОВ

Монтаж и эксплуатация туннельных диодов должны проводиться с учетом выполнения следующих основных требований:

пайку выводов производить паяльником с температурой конца паяльника не более 250°C не более чем в течение 3 сек с обязательным теплоотводом от корпуса диода;

изгиб вывода допускается на расстоянии не ближе 2 мм от корпуса диода;

при изгибе вывода необходима жесткая фиксация его основания, причем давление на крышку диода со стороны зажимов, крепящих корпус, не должно превышать 1,5 кг.

В процессе разработки и наладки схем с диодами в целях повышения долговечности диода необходимо по возможности не допускать, чтобы ток через диод на второй восходящей ветви превышал $0,5 I_1$. Это требование продиктовано тем обстоятельством, что при длительной работе на диффузионной ветви характеристики при токах, больших предельного, наблюдается явление деградации диода, т. е. неуправляемое изменение тока максимума I_1 и других параметров.

ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАТОРНЫХ УСТРОЙСТВ НА ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДАХ

Простейшая схема включения туннельного диода изображена на рис. 4,а. При соответствующем выборе режима смещения туннельного диода, включенного по этой схеме, и параметров внешних элементов L и R могут быть реализованы самые различные радиотехнические устройства.

Основным условием получения генераторного и усилительного режима работы схемы является установление рабочей точки туннельного диода на участке с отрицательным сопротивлением (прямая 1 на рис. 4,б).

На рис. 4, а приведена эквивалентная схема туннельного диода при работе в усилительном и генераторном режимах. Здесь r_d — отрицательное сопротивление на падающем участке; C_0 — емкость перехода; L_0 — индуктивность выводов; R_0 — сопротивление потерь.

При расчетах генераторов на частотах менее 1 Мгц обычно величиной L_0 пренебрегают.

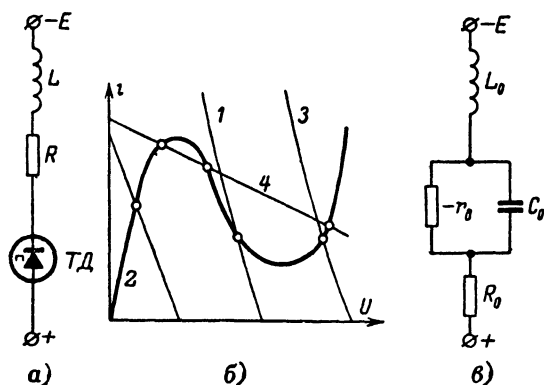


Рис. 4. Основная схема включения туннельного диода (а), основные режимы работы (б), эквивалентная схема диода в режиме усилителя и генератора (в).

Для возникновения в схеме незатухающих колебаний необходимо, чтобы выполнялись следующие неравенства:

$$R + R_0 < |-r_d|; \quad (1)$$

$$U_1 + I_1 R < E < U_2 + I_2 R; \quad (2)$$

$$L + L_0 \geq (R_0 + R) |-r_d| C_0. \quad (3)$$

Чем резче выражается неравенство (3), тем ближе форма колебаний генератора к прямоугольной. При равенстве левой и правой частей выражения (3) форма колебаний близка к синусоидальной.

Для обеспечения работы схемы в усилительном режиме должны выполняться неравенство (1) и неравенство

$$L + L_0 < (R + R_0) |-r_d| C_0. \quad (4)$$

Если рабочая точка туннельного диода находится на восходящей туннельной или диффузионной ветви характеристики и пересекает их только в одной точке (прямые 2 и 3), тогда достигается одновибраторный режим. Наиболее часто используется режим, изображаемый линией нагрузки 2, когда выполняются неравенства

$$R < |-r_d|; \quad (5)$$

$$E < U_1 + I_1 R. \quad (6)$$

Прямая 4 соответствует триггерному режиму работы. При этом схема имеет два устойчивых состояния на восходящих ветвях. Для обеспечения триггерного режима должны выполняться неравенства

$$\left. \begin{aligned} R > | -r_{\pi} |; \\ U_2 + I_2 R \leq E. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Комбинацией туннельных диодов с резисторами, конденсаторами, диодами и транзисторами можно сравнительно просто получить такие схемные решения, осуществить которые на лампах и транзисторах было бы затруднительно.

Расчеты режимов туннельных диодов и параметров генераторных устройств, собранных на них, на практике производятся графоаналитическим методом, т. е. когда нелинейные зависимости аппроксимируются прямолинейными участками. Этот метод достаточно прост и будет приведен при расчетах отдельных схем. Однако следует иметь в виду, что ряд практических схем на туннельных диодах вследствие разброса их характеристик и трудностей учета параметров цепей запуска и нагрузки требует индивидуальной доводки и наладки. Чаще всего наладка сводится к подбору напряжения питания или сопротивлений резисторов в цепях смещения.

Особым вопросом при разработке генераторных устройств является вопрос согласования диодов с транзисторными каскадами. Одно из основных достоинств диодов — их высокая граничная частота, которая составляет величину порядка 10^{11} гц (теоретический предел — 10^{13} гц), может нивелироваться из-за того, что доступные туннельные диоды обладают низкой выходной мощностью.

Выражение для максимальной выходной мощности, которую можно получить от одного диода, имеет следующий вид:

$$P_{\text{макс}} = \frac{1}{2} (U_2 - U_1) (I_1 - I_2).$$

Мощность, отдаваемая в нагрузку в режиме генерации импульсов для диодов серии АИ301 не превышает 10 мвт, а в режиме генерации гармонических колебаний — в несколько раз меньше.

Малая выходная мощность генераторов на туннельных диодах приводит к тому, что в ряде случаев при разработке мощных высокочастотных генераторных устройств приходится вводить дополнительные каскады усиления на транзисторах. В то же время верхний частотный предел транзисторов значительно ниже, чем у туннельных диодов. По теоретическим предпосылкам граничная частота транзисторов не превышает 10^{10} гц, но поскольку доступные высокочастотные транзисторы (П416, П403, П411, ГТ311 и др.) имеют верхний предел 10^8 — 10^9 гц, «умощнение» высокочастотных генераторов на туннельных диодах часто приходится производить другими путями, в частности параллельным включением диодов.

Такого же рода трудности встречаются при разработке импульсных генераторов, к выходным импульсам которых предъявляются высокие требования в отношении крутизны фронта и амплитуды.

Импульсы, формирующиеся на туннельных диодах в режиме автогенерации, имеют длительности фронта, приближенно определяемые из следующих соотношений:

$$t_{\phi} = 0,45 \frac{C_{\pi}}{I_1}$$

для германиевых диодов и

$$t_{\Phi} = \frac{C_A}{I_1}$$

для арсенид-галлиевых диодов.

Для диодов серии АИЗ01 t_{Φ} составляет 3—10 *нсек*.

Некоторые схемы усилителей с транзисторами, которые предназначены для работы в импульсных режимах, например П416Б, обеспечивают длительность фронта 10—30 *нсек*. Это хотя и снижает эффективность схем с туннельными диодами, но достаточно для ряда прикладных задач.

В приведенных в гл. 3 схемах импульсных генераторов транзисторы, как правило, работают в ключевых режимах, что упрощает схемы, но еще более ухудшает параметры выходных импульсов. Например, импульс, сформированный при резком отпирании транзистора типа П416Б, имеет следующие параметры: длительность фронта 50 *нсек* (на уровне 0,5—30 *нсек*), длительность спада 150 *нсек* (на уровне 0,5—50 *нсек*). Поэтому, если к крутизне фронта и спада предъявляются повышенные требования, необходимо, чтобы усиленные каскады работали в линейном, а не ключевом режиме.

Глава вторая

ГЕНЕРАТОРЫ И ФОРМИРОВАТЕЛИ ИМПУЛЬСОВ С ИНДУКТИВНОСТЬЮ НА ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДАХ

Генераторы с индуктивностью на туннельных диодах несмотря на простоту схем (рис. 5) обладают широким диапазоном генерируемых частот, малой потребляемой мощностью, стабильностью частоты и возможностью ее быстрой перестройки.

Обычно используют на практике две основные схемы генераторов. В генераторе последовательного типа (рис. 5,а) колебательный контур составлен из индуктивности L и емкости туннельного диода. Так как емкость колебательного контура в этом генераторе может быть очень малой, именно по этой схеме строятся генераторы на максимальную рабочую частоту. Сопротивление нагрузочного резистора R_2 необходимо при этом выбирать настолько малым, чтобы обеспечить устойчивость схемы к изменениям напряжения питания.

Подключаемый параллельно туннельному диоду конденсатор C_1 позволяет понижать частоту и увеличивать длительность выходных импульсов.

Схемы с параллельным резонансным контуром (рис. 5,б и в) более стабильны по частоте, однако колебания генератора содержат большее количество гармоник при большей амплитуде колебаний. С увеличением частоты колебаний содержание гармоник падает.

Повышению стабильности частоты в генераторе последовательного типа может способствовать неполное включение контура.

Рассмотрим принцип работы генераторов с индуктивностью. Туннельные диоды (ТД) выполняют здесь роль элемента с отрицательным сопротивлением. Ток через диод выбирается таким, чтобы рабочая точка диода лежала на падающем участке вольт-амперной характеристики.

Диаграммы, приведенные на рис. 6, относятся к генераторам со сравнительно большой (более 10 мкГн) индуктивностью, когда форма выходных импульсов близка к прямоугольной. Это имеет место, если траектория рабочей точки при переключениях заходит

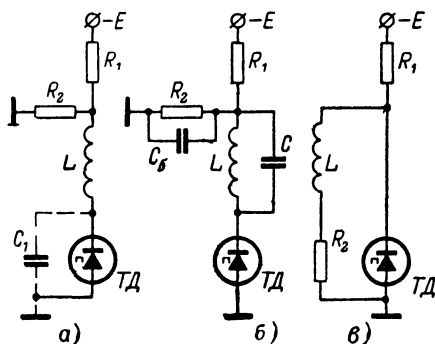


Рис. 5. Схемы генераторов с индуктивностью.

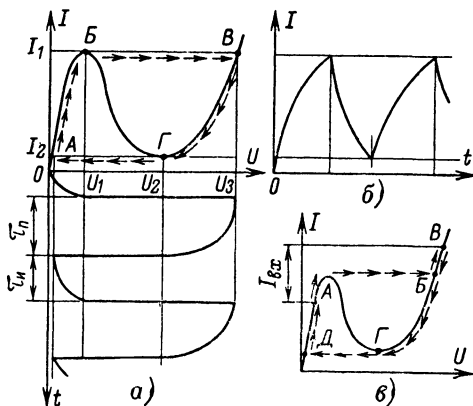


Рис. 6. Диаграммы токов и напряжений туннельного диода в режиме генерации импульсов.

на участки восходящих ветвей. Если же траектория рабочей точки не выходит за пределы участка с отрицательным сопротивлением, форма колебаний будет близка к синусоидальной.

При включении источника питания из-за наличия индуктивности ток в цепи начинает постепенно увеличиваться от нуля до максимума I_1 на туннельной ветви, где происходит переключение на диффузионную ветвь характеристики. Поскольку время переключения очень мало, ток через индуктивность не успевает резко изме-

ниться. В это время на диоде формируется крутой фронт импульса. Строго говоря, на участках $ВВ$ и $ГА$ (рис. 6,а) скорость движения рабочей точки, а значит, и скорость переключения диода зависят от скорости заряда емкости самого диода и присоединенной к нему внешней емкости.

Далее на индуктивности L напряжение меняет знак и ток в цепи начинает падать до величины I_2 , при которой снова происходит переключение на туннельную ветвь в точку A и т. д. На рис. 6,а внизу показаны диаграммы тока на туннельном диоде. Импульсы тока, имеющие заметный пилообразный характер (рис. 6,б), можно наблюдать с помощью осциллографа на резисторе R_2 .

На рис. 6,в схематично показаны траектории движения рабочей точки диода, включенного в схему ждущего генератора. Рабочая точка диода исходно смещена в точку A . При поступлении короткого импульса тока амплитудой $I_{вх}$ она перемещается на вторую восходящую ветвь и затем вновь возвращается в точку A . В этом режиме генератор выполняет функцию одновибратора. Если же входной сигнал имеет длительность большую, чем время релаксации схемы, устройство превращается в генератор «пачек» импульсов.

Расчет основных характеристик релаксационных генераторов импульсов последовательного типа на практике производят с помощью следующих формул:

для длительности импульса $\tau_{и}$

$$\tau_{и} = \frac{L}{R + \bar{R}_{д1}} \ln \left[1 + \frac{(I_1 - I_2)(R + \bar{R}_{д1})}{RI_2 + U_2 + U_{см}} \right]; \quad (8)$$

для длительности паузы $\tau_{п}$

$$\tau_{п} = \frac{L}{R + \bar{R}_{д3}} \ln \left[\frac{U_{см} - I_2(R + \bar{R}_{д3})}{U_{см} - I_1(R + \bar{R}_{д3})} \right]. \quad (9)$$

В формулах (8) и (9) $\bar{R}_{д1}$, $\bar{R}_{д3}$ — усредненные дифференциальные сопротивления диода на той ветви характеристики, где происходит формирование выходной величины импульса или паузы. Хотя, если судить по кривым на рис. 1, сопротивление диода R_d меняется по закону, несколько отличающемуся от линейного, обычно для простоты расчетов применяют так называемую линейную аппроксимацию участка, т. е. замену его прямой линией.

Поскольку формирование вершины импульса происходит на диффузионной ветви вольт-амперной характеристики, усредненное сопротивление диода на этом участке

$$\bar{R}_{д3} = \frac{U_3 - U_2}{I_1 - I_2}. \quad (10)$$

Формирование паузы происходит на туннельной ветви характеристики и, следовательно, здесь

$$\bar{R}_{д1} = \frac{U_1}{I_1}. \quad (11)$$

Напряжение смещения на диоде $U_{см}$ определяется из уравнения

$$U_{см} = E \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (12)$$

Сопротивление нагрузочного резистора R в выражении (8) определяется из соотношения

$$R = R_1 R_2 (R_1 + R_2). \quad (13)$$

Для схем, где $R_1 \gg R_2$, и с учетом того, что $I_2 \ll I_1$, с подстановкой соответствующих значений из (10—13) уравнения (8) и (9) приводят к виду:

$$\tau_{\text{и}} = \frac{L}{R_2 + \frac{U_3 - U_2}{I_1}} \ln \frac{R_2 I_1 + U_3 - U_{\text{см}}}{U_2 - U_{\text{см}}}; \quad (14)$$

$$\tau_{\text{п}} = \frac{L}{R_2 + \frac{U_1}{I_1}} \ln \frac{U_{\text{см}}}{U_{\text{см}} - I_1 R_2 - U_1}. \quad (15)$$

Пример расчета. Дано: генератор последовательного типа с диодом ЗИ301Г ($I_1 = 10$ ма, $I_2 = 0,5$ ма, $U_1 = 150$ мв, $U_2 = 600$ мв, $U_3 = 1000$ мв); $L = 0,12$ гн, $R_1 = 160$ ом, $R_2 = 10$ ом, $E = 8$ в. Определить $\tau_{\text{и}}$ и $\tau_{\text{п}}$. Решение: поскольку $I_1 \gg I_2$ и $R_1 \gg R_2$, воспользуемся соотношениями (14), (15) и (12):

$$\tau_{\text{и}} = \frac{0,12}{10 + \frac{1 - 0,6}{0,01}} \ln \frac{10 \cdot 0,01 + 1 - 0,47}{0,6 - 0,47} = 2,52 \text{ мсек};$$

$$\tau_{\text{п}} = \frac{0,12}{10 + \frac{0,15}{0,01}} \ln \frac{0,47}{0,47 - 0,01 \cdot 10 - 0,15} = 3,5 \text{ мсек}.$$

Экспериментальные измерения дали следующие результаты: $\tau_{\text{и}} = 2,3$ мсек; $\tau_{\text{п}} = 3$ мсек. Таким образом, формулы (14) и (15) позволяют с достаточной точностью определить основные характеристики генератора.

Обычно при разработке схем генераторов конструктора интересует вопрос выбора параметров схемы под заданную частоту генерации. Исходными данными для расчета, кроме значения частоты колебаний, должны быть степень регулировки частоты, требования к стабильности, надежности и экономичности генератора. В этом случае большую помощь оказывают номограммы или реальные характеристики генератора для всего диапазона частот.

На основании большого количества экспериментальных измерений получены графики на рис. 7 для генераторов последовательного типа с диодами типа ЗИ301. На рис. 7,а показаны зависимости частоты релаксационных колебаний генератора с диодами различных типов от индуктивности L (при $R_2 = 10$ ом; $E = 8$ в). При постоянной величине индуктивности указанный на графиках диапазон регулирования обеспечивается изменением напряжения смещения на туннельном диоде. Частота генератора также зависит от типа включенного диода. Например, при $L = 100$ мкгн предельная частота

генератора на диоде типа ЗИ301Г на порядок ниже, чем для генератора с диодом ЗИ301А*.

О зависимости пределов регулировки частоты импульсов генератора от величины напряжения смещения $U_{см}$ на диоде и от сопротивления резистора R_2 можно судить по графику на рис. 7,б. Кривые на графике построены по экспериментальным результатам для генератора с диодом типа ЗИ301Г и контуром с $L=5 \text{ мкГн}$ на сердечнике марки К-65 (10 витков провода ПЭЛШО 0,1). Область устойчивой работы заключена в секторе, образованном штриховыми линиями. Наибольшая степень перекрытия по частоте (более чем в 2 раза) имеет место при малых значениях R_2 и изменении напряжения смещения в пределах 0,2—0,33 в. Однако, несмотря на

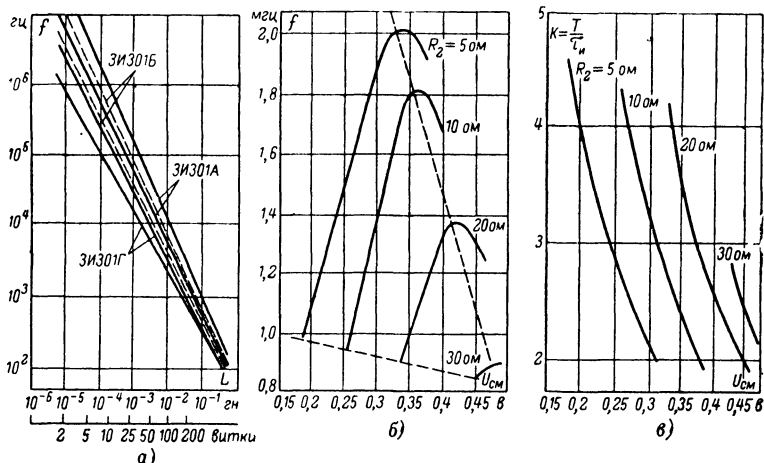


Рис. 7. Характеристики генераторов последовательного типа.

облегченные условия работы диода, такого рода режимы следует использовать только в схемах с питанием от сравнительно мощного источника, поскольку расход тока здесь велик (при $E=8 \text{ в}$ ток потребления на частоте 2 МГц составляет 50—60 ма). Длительности выходных импульсов генератора с характеристиками на рис. 7,б не выходят за пределы 0,17—0,22 мксек.

С ростом сопротивления резистора R_2 потребление тока падает, но из-за увеличения $U_{см}$ ухудшается режим работы туннельного диода и уменьшаются пределы регулировок. Оптимальные параметры генератора с диодом типа ЗИ301Г имеют место при $R_2=20 \div 25 \text{ ом}$. Для генераторов с диодом типа ЗИ301А сопротивление R_2 может составлять 75—100 ом.

Относительные пределы регулировок по частоте снижаются также с уменьшением частоты генератора. Например, для генератора с диодом типа ЗИ301Г и катушкой индуктивности на ферритовом

* На рис. 7,а для удобства приведена горизонтальная шкала числа витков катушек, намотанных на сердечнике из феррита марки 2000НМ, ($10 \times 6 \times 5 \text{ мм}$) при намотке проводом ПЭЛШО 0,1.

сердечнике марки 2000НМ размерами $17 \times 7 \times 5$ мм (400 витков провода ПЭЛШО 0,1) при $R_2 = 10$ ом, $E = 8$ в диапазон регулировки равен 90—100 гц.

Недостатком генераторов с индуктивностью является одновременное изменение длительности и скважности выходных импульсов при перестройке частоты. Графики на рис. 7, в иллюстрируют зависимость скважности от напряжения смещения на диоде. Кривые на рис. 7, б и в получены для одной и той же схемы.

Регулировочные свойства генераторов на диодах различных типов с параллельным включением индуктивности характеризуют графики на рис. 8. Графики получены для генератора с параметрами: $L = 120$ мкГн (10 витков провода ПЭЛ 0,1 на ферритовом кольце марки 2000НМ размерами $10 \times 6 \times 5$ мм), $R_2 = 10$ ом. Здесь же для сравнения штриховыми линиями приведены регулировочные характеристики генератора последовательного типа, но с аналогичными параметрами схемы.

Видно, что при одинаковом $U_{см}$ генератор параллельного типа имеет более высокую рабочую частоту, чем генератор последовательного типа. Графики на рис. 8 также наглядно представляют зависимость частоты от типа используемого диода.

При проектировании генераторов искомые значения индуктивностей можно находить также расчетным путем, используя уравнения (8) и (9). Для проведения расчетов с точностью 10—20% удобнее пользоваться менее громоздким приближенным уравнением. Делать упрощения позволяет тот факт, что характерные параметры диодов U_1 , U_2 , U_3 и отношение I_1/I_2 практически не зависят от величины тока максимума I_1 и являются постоянными для всех туннельных диодов из данного полупроводникового материала. В частности, для арсенид-галлиевых диодов типа 3ИЗ01 можно принять следующие усредненные значения: $U_1 = 0,14$ в, $U_2 = 0,6$ в, $U_3 = 1$ в, $I_1/I_2 > 10$. С учетом этого факта и при $R_1 \gg R_2$ искомая формула имеет следующий вид:

$$L = \frac{1}{f I_1} \frac{2 I_1 R_2 +}{(I_1 R_2 + 0,15)(5 R_2 I_1 + 3) +} \rightarrow \frac{+ 0,55}{+ (I_1 R_2 + 0,4) \ln \frac{0,4}{0,25 - I_1 R_2}} \quad (16)$$

Пример расчета. Дано: генератор последовательного типа с диодом 3ИЗ01А; $U_{см} = 0,4$ в, $E = 8$ в, $R_2 = 10$ ом, $f = 10^6$ гц.

Определить значения L и R_1 .

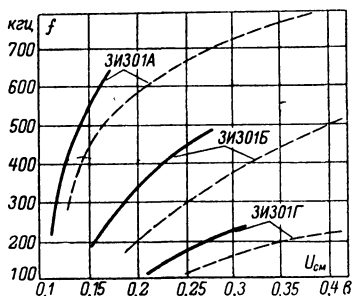


Рис. 8. Характеристики генераторов параллельного типа.

Решение: сопротивление R_1 находим из уравнения (12):

$$R_1 = \frac{R_2 E}{U_{\text{см}}} = \frac{10,8}{0,4} = 200 \text{ ом.}$$

Значение индуктивности определяем из уравнения (16):

$$L = \frac{1}{10^6 \cdot 2 \cdot 10^{-8}} \frac{2 \cdot 0,002 \cdot 10 + 0,55}{0,17 \cdot \ln 3,1 + 0,42 \cdot \ln 1,7} = 7,5 \cdot 10^{-6} \text{ гн.}$$

Сравнивая найденное значение с индуктивностью L , которая получена по графику на рис. 7,а, убеждаемся в удовлетворительном их совпадении. Из этого же графика находим параметры катушки L : 7—8 витков провода ПЭЛШО 0,1 на ферритовом кольце марки 2000НМ, размерами $10 \times 6 \times 5$ мм.

Теперь перейдем к рассмотрению конкретных схем генераторов и приборов.

ПРОБНИКИ НА ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДАХ

Компактность, экономичность и простота схем генераторов с индуктивностью дают возможность конструировать малогабаритные и удобные пробники — передатчики для проверки и настройки различного рода радио- и телевизионной приемной аппаратуры.

На рис. 9 даны две схемы пробников для проверки радиоприемной аппаратуры в полевых условиях. Пробники, фотография внешнего вида и вида на монтаж которых приведена на рис. 11, собраны по принципиально аналогичным схемам. Пробник, собранный по схеме на рис. 9,а, генерирует колебания с частотой 250 кГц, промодулированные по амплитуде звуковой частотой 400 Гц; пробник на рис. 9,б генерирует колебания с частотой 1 500 кГц с модуляцией 350 Гц.

Каждый из пробников включает два генератора. Низкочастотные генераторы на диодах $ТД_2$ работают в автоколебательных режимах с частотой повторения выходных импульсов отрицательной полярности 350—400 Гц. На рис. 10,а показана осциллограмма сигналов на выходе схемы рис. 9,а; на рис. 10,б — осциллограмма импульсов несущей частоты. Частота колебаний на выходе низкочастотных генераторов определяется прежде всего выбором значения L_2 и C_1 . Емкость конденсатора C_1 определяет также длительность импульса. В данном случае она расширяет длительность выходных низкочастотных импульсов до 1,2 мсек, что обеспечивает получение мягкого монотонного звучания на выходе проверяемого радиоприемника.

Второй генератор на диоде $ТД_1$ работает в ждущем режиме. Возбуждаясь при приходе отрицательных импульсов, он генерирует «пачки» высокочастотных сигналов с частотой повторения 350—400 Гц. Поскольку форма высокочастотных колебаний несинусоидальна, пробники излучают ряд гармоник в различных диапазонах волн. Пробник с несущей частотой 250 кГц имеет почти симметричную (типа «меандр») форму высокочастотных импульсов благодаря включению конденсатора C_2 . В пробнике на рис. 9,б эту роль выполняют емкости диода и монтажа.

Основные гармоники первого пробника простираются от 250 до 1 250 кГц, второго — от 1,5 до 50 МГц, что делает второй пробник

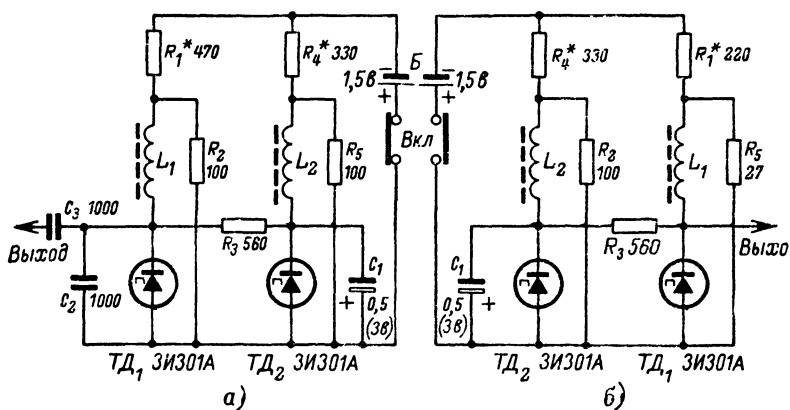


Рис. 9. Схемы пробников для проверки радиоприемных устройств.

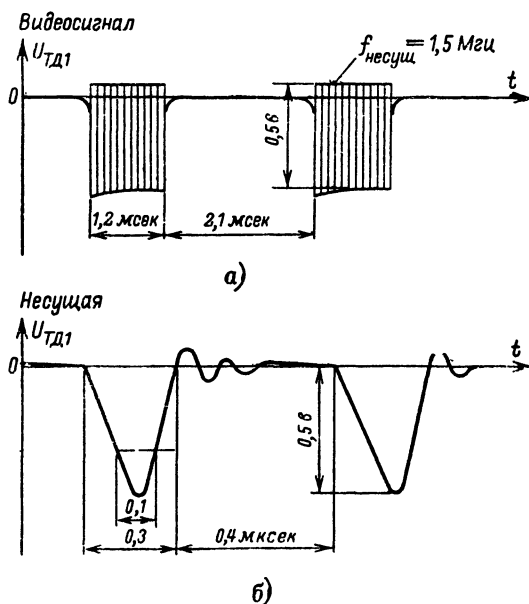


Рис. 10. Диаграммы импульсов в схеме пробника.

пригодным для проверки и одновременного контроля высокочастотного и низкочастотного трактов телевизионных приемных устройств. В этом случае при касании антенного гнезда исправленного телевизора слышен звук частоты 350 гц и на экране появляется устойчивое изображение шести-семи темных полос.

Выходная мощность пробников достаточна для приема его сигналов радиоприемником типа «Атмосфера» на расстоянии 0,4—0,6 м. С антенной в виде двух-трехметрового отрезка провода радиус уверенного приема сигналов пробника составляет 8—12 м. Питание пробников (элемент 316) обеспечивает непрерывную работу в течение 30—35 ч.

В качестве элементов схемы выбираются малогабаритные радио-детали: резисторы типа УЛМ и МЛТ-0,125, электролитический кон-

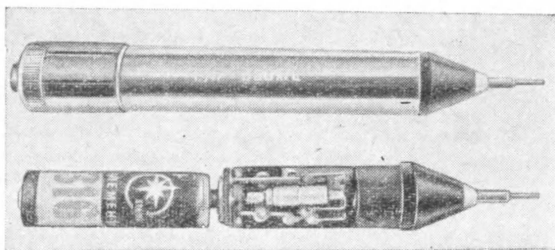


Рис. 11. Внешний вид пробника.

денсатор C_1 типа ЭМИ. Моточные данные катушек индуктивности следующие: для пробника на рис. 9,а катушка L_2 мотается проводом ПЭЛШО 0,1 (250 витков) на двух склеенных кольцах ФМ 2000НМ ($10 \times 6 \times 5$ мм), L_1 имеет 70 витков того же провода на кольце К-65 ($10 \times 6 \times 2,5$ мм); для пробника на рис. 9,б — катушка L_2 имеет 360 витков провода ПЭЛШО 0,1 на сердечнике из двух колец 2000НМ ($10 \times 6 \times 5$ мм), L_1 имеет 7 витков провода ПЭЛШО 0,1 на кольце 600НН ($7 \times 4 \times 2$ мм).

Размещение элементов пробников показано на фотографиях датчиков на рис. 11. Максимальные размеры пробника: диаметр — 20 мм, длина — 150 мм.

Налаживание пробников. Рассмотрим последовательность операций при проведении наладки пробников на примере схемы рис. 9,а. Настройка пробника проста, но требует аккуратности и точности, так как сравнительно высокие сопротивления резисторов R_2 и R_5 в цепях делителей делают режим работы туннельного диода зависимым от сопротивлений резисторов R_1 и R_4 . Изменению, например, сопротивления балластного резистора R_1 в пределах 290—360 ом соответствует интервал частот 350—430 гц.

Перед включением пробников вместо резисторов R_1 и R_4 желательно включать переменные резисторы сопротивлением 1 ком или магазины сопротивления. Контролировать работу удобно с помощью электронного осциллографа, имеющего гальванический вход. Постепенно уменьшая сопротивление в цепи смещения, нужно получить устойчивое изображение релаксационных колебаний характерной формы (ей соответствует огибающая на осциллограмме рис. 10,а),

а затем получить «пачки» импульсов на туннельном диоде TD_1 . Одновременно с этим необходимо следить за изменением потенциала на туннельном диоде. Если туннельный диод перешел в возбужденное состояние (напряжение на нем скачком увеличивается до 1 в), но генерация отсутствует, основные неисправности таковы: короткое замыкание витков катушек L_1 и L_2 , обрыв резисторов R_2 и R_5 или их сопротивления завышены.

Схемы пробников на рис. 12 являются дальнейшим развитием ранее описанных схем. Они предназначены для контроля трактов

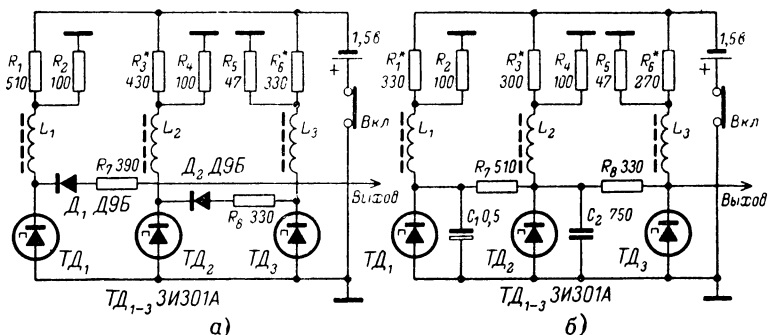


Рис. 12. Схемы пробников для проверки телевизоров.

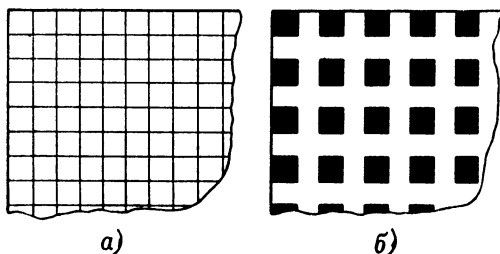


Рис. 13. Сигналы сеточного раstra.

сигналов изображения и звукового сопровождения, а также для проверки линейности разверток телевизоров в домашних условиях.

Известно, что в заводских лабораториях эти задачи выполняют приборы, включающие в себя генератор шахматного поля; схемы этих приборов сложны и громоздки. Тем не менее в ряде практических случаев можно обойтись пробниками, генерирующими видеосигналы определенной периодической структуры без введения специальных синхронизирующих сигналов.

Схема на рис. 12,а формирует сигналы так называемого «сеточного раstra» (рис. 13,а). Пробник состоит из двух самовозбуждающихся генераторов и ждущего генератора «пачек». Генератор на диоде TD_1 введен в режим генерирования релаксационных колеба-

ний с частотой 750 гц, а генератор на диоде TD_2 — с частотой 300 кгц.

Генератор несущей частоты на диоде TD_3 возбуждается при приходе импульсов тока отрицательной полярности длительностью 250—350 мксек от первого генератора и импульсов длительностью 1—1,3 мксек от второго генератора. Для обеспечения стабильной работы генератора с рабочей частотой, равной несущей частоте первых телевизионных каналов, необходимо было бы уменьшить сопротивление резистора R_6 до 10—20 ом. Поскольку такой режим генератора вызывает резкое увеличение потребляемого от батареи тока, в данном пробнике частота несущей равна приблизительно 5 Мгц, а для контроля высокочастотных трактов телевизора используются гармоника более высоких порядков.

Сквозность импульсов генераторов на диодах TD_1 и TD_2 более высока по сравнению со схемами на рис. 9 из-за отсутствия шунтирующих емкостей. Поэтому полосы сетки на экране телевизора имеют одинаковую и сравнительно небольшую толщину.

Диоды D_1 и D_2 служат для уменьшения взаимовлияния генераторов. Резисторы R_7 и R_8 играют роль нагрузочных. Внешний вид и конструкция пробников такие же, как и у пробников на рис. 10. Потребление тока не превышает 12—15 ма.

Для проверки телевизионного приемника нужно коснуться выходным штырем пробника антенного гнезда и нажать кнопку *Вкл.* На экране исправного телевизора появляется «сетка» с числом полос по вертикали — 15, по горизонтали — 20. Громкоговоритель телевизора воспроизводит характерный тон звука частотой 750 гц.

Порядок налаживания схемы следующий: вначале настраивают генераторы на диодах TD_1 и TD_2 , затем генератор на диоде TD_3 . Для контроля настройки используют осциллограф с полосой пропускания не менее 5 Мгц или же исправный телевизор. Данные моточных узлов схемы таковы: катушка L_1 — два склеенных кольца из феррита марки 2000НМ размерами 10×6×5 мм (150 витков провода ПЭЛ 0,1), L_2 — кольцо К-65 (150 витков провода ПЭЛ 0,1), L_3 — кольцо из феррита марки 600НН, 7×4×2 мм (5 витков провода ПЭЛШО 0,31).

Пробник, собранный по схеме на рис. 12,б формирует телевизионный испытательный сигнал в виде периодических темных квадратов на экране телевизора, что дает возможность довольно точно оценить качество работы его развертывающих устройств. Как и в схемах на рис. 9, генератор на диоде TD_1 работает в автоколебательном режиме с частотой повторения импульсов формы «меандр» около 700 гц. Отрицательным перепадом тока с туннельного диода TD_1 запускается ждущий генератор на диоде TD_2 , который формирует «пачки» импульсов частотой 250 кгц. В свою очередь его выходными отрицательными импульсами запускается генератор «пачек» несущей частоты на диоде TD_3 . Рабочая частота последнего 5 Мгц.

При касании штырем пробника антенного гнезда телевизора на экране появляются периодически повторяющиеся темные квадраты (рис. 13,б) и из громкоговорителя слышен монотонный звук частотой 700 гц.

Схема размещена на печатной плате размерами 15×40 мм. Конструктивное исполнение такое же, как у предыдущего пробника. Данные моточных узлов: катушка L_1 — два склеенных кольца из феррита марки 2000НМ размерами 10×6×5 мм (230 витков провода ПЭЛ 0,1); L_2 — кольцо из того же феррита размерами 10×6×

$\times 2$ мм (100 витков провода ПЭЛ 0,1), L_3 — кольцо из феррита марки 600НН размерами $7 \times 4 \times 2$ мм (5 витков провода ПЭЛШО 0,31).

Используя рассмотренные принципы построения схем можно конструировать пробники, которые позволяют создавать на экране телевизора различные периодические структуры: полосы, сетки, квадраты, шахматные поля и т. п.

Очевидными недостатками рассмотренных схем пробников являются: отсутствие элементов регулировки и подстройки частоты отдельных генераторов, а также непригодность пробников к точной проверке переключателей телевизионных каналов. Эти недостатки устранены в описываемом ниже генераторе периодических полей.

ГЕНЕРАТОР ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Генератор периодических полей предназначен для контроля «сквозного» тракта видео- и звуковых сигналов телевизионных приемников и проверки линейности кадровой и строчной разверток в домашних условиях. Его технические характеристики: несущая частота высокочастотных колебаний 60—70 МГц; низкочастотные

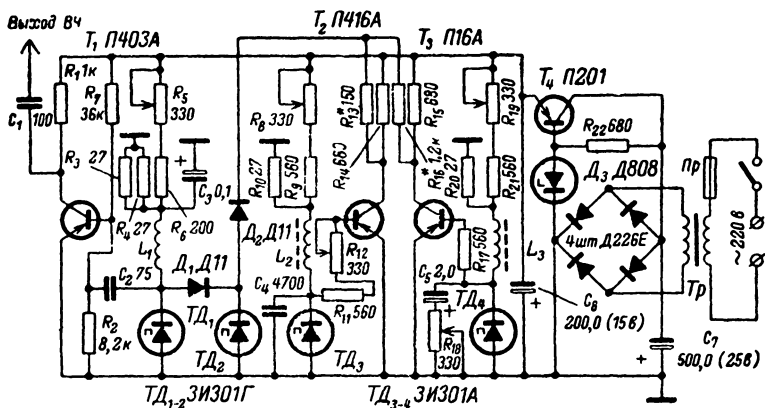


Рис. 14. Схема генератора периодических полей.

составляющие видеосигнала 300—450 гц, 100—135 кГц; стабильность частот и длительностей сигналов при температуре окружающей среды $20 \pm 10^\circ \text{C}$ составляет $\pm 1\%$; питание — сеть переменного тока напряжением 220 в, потребляемая мощность 2 вт; размеры прибора $1500 \times 70 \times 80$ мм; вес 1500 г.

Основу схемы прибора (рис. 14) составляют три генератора на туннельных диодах $ТД_1$, $ТД_3$, $ТД_4$ с индуктивностью, которые принципиально ничем не отличаются от ранее описанных. С целью лучшей стабилизации режимов работы туннельных диодов и расширения пределов регулировки частоты сопротивления резисторов делителя R_{10} и R_{24} уменьшены до 27 ом, а R_3 и R_4 — до 13 ом.

Генераторы на диодах $TД_3$ и $TД_4$ работают в автоколебательном режиме на средних частотах, соответственно 120 кГц и 400 Гц. Форма выходных импульсов типа «меандр» достигается для первого генератора изменением сопротивления резистора R_{12} (ширина поля), для второго — резистора R_{18} — (высота поля). Соответственное изменение частоты генерации компенсируется изменением сопротивления резисторов R_8 и R_{19} в цепях смещения. Этими же резисторами, ручки которых выведены на переднюю панель прибора (см. рис. 15), осуществляется синхронизация работы генераторов прибора с генераторами кадровой и строчной разверток телевизора.

Усиленные и инвертированные сигналы с коллекторов транзисторов T_2 и T_3 смешиваются по схеме совпадений на туннельном диоде $TД_2$, выполняющем, кроме того, функции буферного каскада.

Генератор несущей частоты на диоде $TД_1$ настроен на частоту сигналов второго телевизионного канала и находится в ждущем режиме, возбуждаясь при приходе «строчных» импульсов частотой 100—135 кГц, ранее промодулированных «кадровыми» импульсами частотой 300—450 Гц.

Резистор R_5 , кроме функции регулировки в небольших пределах амплитуды и частоты выходных сигналов, может обеспечивать при уменьшении сопротивления вывод рабочей точки туннельного диода $TД_1$ на диффузионную ветвь характеристики. Таким образом меняется полярность выходных импульсов и соответственно яркость квадратов на экране телевизора. Напряжение высокой частоты после усиления каскадом на транзисторе T_1 подается на выходной разъем.

Описанная схема может быть модифицирована в генератор шахматного поля. Для этого используют два дополнительных фазоинвертора, собранных на транзисторах П416Б по схеме с общим эмиттером и запускаемых импульсами с коллекторов транзисторов T_2 и T_3 . Диод $TД_2$ при этом одновременно является смесителем сигналов, сдвинутых по фазе на 180° .

Т а б л и ц а 2

Обозначение по схеме	Тип сердечника	Число витков	Провод
L_3	2 кольца из феррита марки 2000НМ размерами $10 \times 6 \times 5$ мм	360	ПЭЛШО 0,1
L_2	Кольцо К-65, размерами $10 \times 6 \times 2,5$ мм	110	ПЭЛШО 0,1
L_1 Tp	Бескаркасная намотка Унифицированный выходной кадровый ТВК-70	1—2	ПМ 0,51

Питание схемы осуществляется от полупроводникового стабилизатора с вторичным напряжением 8 в. Потребляемый ток не превышает 60 мА.

Схема размещена на печатной плате размерами 140×70 мм. Данные моточных узлов представлены в табл. 2.

Перед первым включением прибора все переменные резисторы должны быть полностью введены. Налаживание следует начинать с подбора режимов генераторов на диодах $TД_3$ и $TД_4$. Затем, до-

бившись удовлетворительной работы схемы совпадений на диоде TD_2 (подстройка с помощью резисторов R_{13} и R_{16}), нужно приступить к наладке генератора несущей частоты и установке линейного режима работы усилителя на транзисторе T_1 . Каскады на транзисторах T_2 и T_3 , работающих в режиме насыщения, наладки не требуют.

Перед проведением проверки телевизора необходимо установить в антенное гнездо и выходной разъем прибора (рис. 15) проводни-

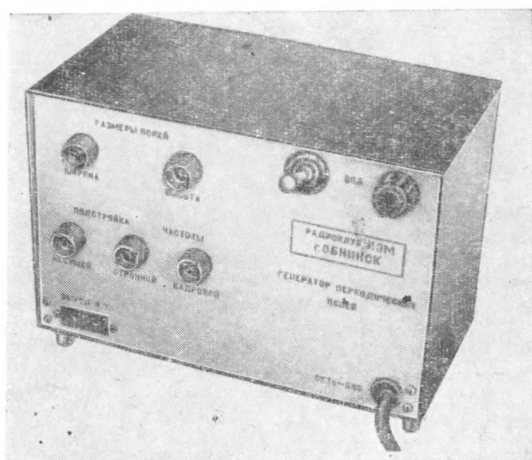


Рис. 15. Общий вид генератора периодических полей.

ки длиной по 1—2 м или телевизионные штыревые антенны. При включении прибора на экране исправного телевизора появляется рисунок в виде равномерно размещенных темных и светлых квадратов, по 6—9 квадратов по вертикали и по 7—9 квадратов по горизонтали. Ручками *Подстройка несущей*, *Подстройка строчной* и *Подстройка кадровой* на передней панели генератора добиваются четкого и устойчивого изображения полей. Искажения последних позволяют судить о степени линейности разверток.

ПРОБНИКИ С ДВУХКОНТУРНЫМ ГЕНЕРАТОРОМ

Одной из первых схем пробников для проверки бытовой радиоаппаратуры была опубликованная в журнале «Electronics» № 41 за 1962 г. схема пробника с двухконтурным генератором (рис. 16,а). От ранее рассмотренных схем пробников с отдельными генераторами эта схема отличается тем, что содержит только один туннельный диод. Однако, забегая несколько вперед, отметим, что схемы с двухконтурными генераторами весьма критичны к стабильности питающего напряжения и более сложны в настройке.

В генераторе на рис. 16,а имеются два отдельных колебательных контура. Один контур составлен из элементов L_3C_3 и настроен

на звуковую частоту 400 гц, второй — из элементов L_2 и емкости туннельного диода; он настроен на радиочастоту 600 кгц. Релаксационные колебания низкой частоты, накладываясь на напряжение постоянного смещения туннельного диода с током максимума $I_1 = 1$ ма, дважды за период перемещают рабочую точку диода в область отрицательного сопротивления.

На выходе схемы в точке В образуются серии импульсов несущей частоты 600 кгц практически синусоидальной формы. Период следования этих серий — 1,25 мсек. В точке А контролируется сиг-

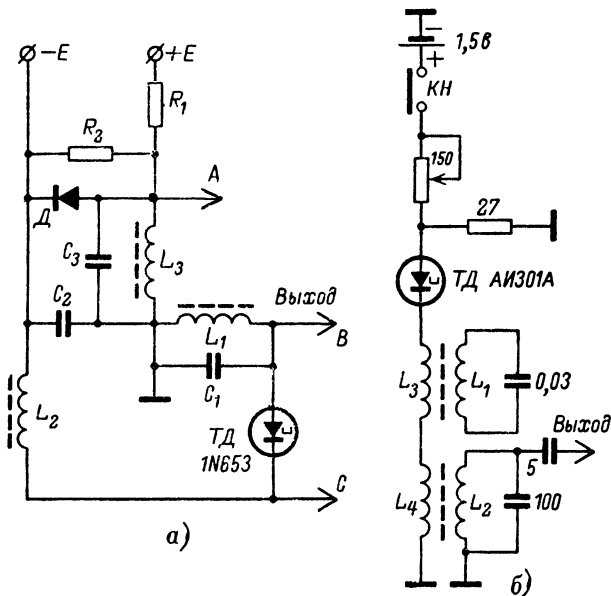


Рис. 16. Схемы двухконтурных генераторов.

нал звуковой частоты 400 гц, в точке С — полный радиосигнал, насыщенный гармониками. Контур L_1C_1 позволяет выделить в точке В напряжение первой гармоники.

Сигналы такого своеобразного передатчика, по данным автора, принимаются на расстоянии 0,7 м при подключении однопроволочной антенны на 7—14 м.

Двухконтурная схема также применена в миниатюрном генераторе-пробнике на рис. 16,б, разработанным Н. Гасяк (журнал «Радио», 1968 г., № 8, стр. 37). Пробник представляет собой генератор несущей частоты порядка 30 Мгц, модулированный по амплитуде звуковой частотой 400 гц. Он используется для проверки телевизоров со входа УПЧ. При этом на экране телевизора появляются восемь горизонтальных черно-белых полос.

Схема пробника размещена в корпусе стандартного электропробника длиной 150 и диаметром 30 мм. Длина щупа 50 мм. Питание — один элемент ФМЦ-0,25. Катушки индуктивности L_1 и L_3

имеют соответственно 30 и 1500 витков провода ПЭВ 0,1, намотанных на кольцо М1000, диаметром 18 мм; L_4 —1 и L_2 —7 витков провода ПЭВ 0,6 на каркасе диаметром 8 мм и длиной 20 мм.

В заключение отметим, что пробники-передатчики на туннельных диодах могут найти широкое применение в телеметрии и медицине, а также как датчики для «Охоты на лис» и т. д.

ПЕРЕСТРОЙКА ДЛИТЕЛЬНОСТИ И ЧАСТОТЫ СЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСОВ ГЕНЕРАТОРОВ

Большим преимуществом генераторов с индуктивностью на туннельных диодах является возможность сравнительно простыми путями осуществить электронную перестройку длительности и частоты следования импульсов.

Наиболее просто электронная перестройка осуществляется изменением напряжения смещения на туннельном диоде. Некоторые данные о пределах перестройки частоты генераторов последовательного типа можно получить из графиков на рис. 7 и 8. В диапазоне частот 10^2 — 10^6 гц достигается дву-пятикратное изменение частоты.

Хорошие пределы регулировки обеспечивает также и изменение емкости конденсатора, подключаемого параллельно туннельному диоду или катушке индуктивности. Например, для схемы генератора на рис. 5,а с диодом типа 3И301Г и $L=10$ ом, $R_2=230$ ом, $E=8$ в изменение подключаемой параллельно диоду емкости в пределах 0,01—0,1 мкф вызывает изменение частоты в пределах 8—5 кгц. При этом более чем в 2 раза возрастает длительность импульса. Именно для расширения длительности генерируемых импульсов и уменьшения их частоты в схемы пробников на рис. 9 и 12 вводятся шунтирующие конденсаторы. Однако при конструировании генераторных схем, нагрузкой которых являются каскады транзисторных усилителей, по схеме с общим эмиттером при повышении емкостей выше 0,1 мкф могут возникать паразитные колебания, имеющие вид «пачек» импульсов. Частота заполняющих импульсов зависит от частотных свойств транзисторов. При использовании транзисторов типа П416—П416Б частота паразитных колебаний составляет около 3—6 Мгц, а для транзисторов типа МП40 она снижается до 1 Мгц.

Изменение частоты колебаний в диапазоне 150—600 Мгц в полтора-два раза можно получать при использовании варикапов, т. е. приборов, емкость которых меняется под действием приложенного напряжения.

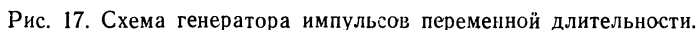
Наибольшие пределы перестройки достигаются при изменении индуктивности колебательного контура генератора. Ниже будут рассмотрены две схемы, где электронная перестройка используется для получения простых и эффективных радиотехнических приборов.

ГЕНЕРАТОР ИМПУЛЬСОВ ПЕРЕМЕННОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Генераторы импульсов переменной длительности используются для быстрой проверки анализаторов временных интервалов и устройств вычислительной техники.

Принципиальная схема генератора представлена на рис. 17,а. Схема состоит из двух генераторов с индуктивностью. Первый генератор на диоде TD_1 работает в автоколебательном режиме с ча-

Конденсатор C_1 , резисторы R_1 и R_2 вместе с входным сопротивлением туннельного диода TD_2 образуют слабо дифференцирующую цепь.



Генератор на диоде $TД_2$ начинает работать при поступлении пилообразных импульсов отрицательной полярности, что соответствует паузе в работе первого генератора. Постепенное смещение на диоде приводит к соответственному повышению частоты колебаний и одновременно к изменению длительности его импульсов в пределах от 200 до 40 мксек (диаграммы θ и z импульсов на коллекторе транзистора T_2). Закон изменения длительностей импульсов и пауз — нелинейный, но скважность сигнала остается почти постоянной. Каскадом на транзисторе T_2 выходные импульсы усиливаются и нормализуются по амплитуде.

26

ГЕНЕРАТОР КАЧАЮЩЕЙСЯ ЧАСТОТЫ

Идея генератора качающейся частоты (рис. 18) состоит в том, что качание частоты генератора последовательного типа с индуктивностью производится с помощью магнитного модулятора.

Генератор, выполненный в виде приставки к электронному осциллографу, предназначен для настройки усилителя промежуточной частоты и переключателя каналов телевизоров. Девияция частоты генератора $0,5—10\text{ МГц}$ при изменении средней частоты в пределах диапазона $20—100\text{ МГц}$ обеспечивается изменением индуктивности L_1 . Катушка L_1 (кольцо из феррита марки 600НН размерами

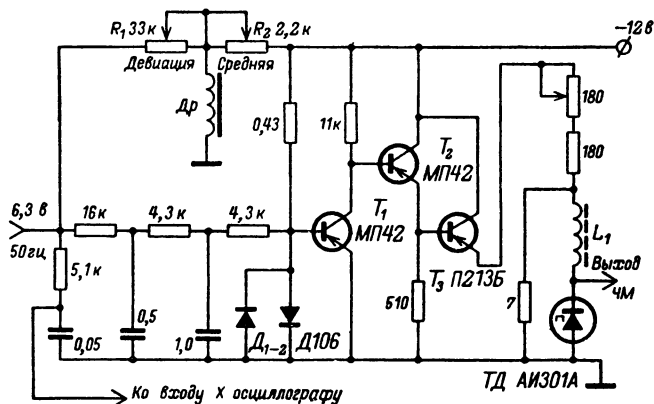


Рис. 18. Схема генератора качающейся частоты.

$8,3 \times 3,6\text{ мм}$) содержит 5 витков провода ПЭЛ 0,3 и размещена в воздушном зазоре дросселя $Др$, выполненного на Ш-образном сердечнике (сечение $10 \times 5\text{ мм}$, 2500 витков провода ПЭЛ 0,14). Регулировка средней частоты генератора обеспечивается изменением постоянного подмагничивающего тока через дроссель $Др$. Диапазон качания частоты устанавливается с помощью резистора R_2 в цепи питания дросселя переменным током промышленной частоты.

С помощью каскадов на транзисторах $T_1—T_3$ и фазосдвигающего устройства в цепи базы транзистора T_1 обеспечивается изменение частоты только во время прямого хода луча горизонтальной развертки осциллографа.

Более подробное описание прибора приведено в журнале «Радио», № 8, 1968, стр. 34.

ДРУГИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ С ИНДУКТИВНОСТЬЮ

Ряд других практических применений генераторов с индуктивностью иллюстрируют схемы на рис. 19.

Весьма интересным и перспективным представляется использование генераторов с индуктивностью на туннельных диодах в схемах генераторов промежуточной частоты радиоприемных устройств. В литературе уже публиковалось несколько таких схем; одна из них

приведена на рис. 19,а. Схема представляет собой генератор последовательного типа с неполным включением индуктивности. Такое включение повышает стабильность генератора и обеспечивает близкую к синусоидальной форму колебаний на выходе. Диод типа Д11 (возможно также использование диодов Д311, Д312) делителя введен в цепь для стабилизации напряжения смещения диода при изменении напряжения питания от 1,5 до 1,0 в. Под-

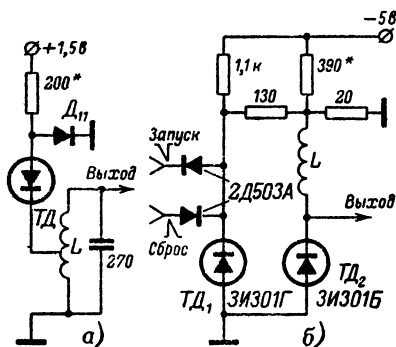


Рис. 19. Разные практические схемы генераторов.

стройка частоты производится изменением индуктивности, выполненной на каркасе диаметром 4 мм (200 витков провода ПЭВ 0,13; отвод от 18-го витка) с сердечником из феррита марки М1000 (диаметр 2,8 мм, длина 12 мм). Туннельный диод должен иметь ток максимума $I_1 = 2$ мА (АИ301А либо ГИ307).

Представляет практический интерес также схема генератора «пачек» импульсов, предложенная А. А. Ивановым (рис. 19,б). В исходном состоянии диод $ТД_1$ находится в невозбужденном состоянии. Он выполняет роль двухстабильного формирователя импульсов

(триггерный режим) и возбуждается при приходе короткого запускающего импульса. Из-за увеличения напряжения смещения одновременно возбуждается также генератор на диоде $ТД_2$. При диаметре катушки индуктивности L 3 мм (2 витка провода ПЭЛ 0,4) частота генератора регулируется в пределах 150—330 МГц изменением начального смещения диода $ТД_2$. При поступлении на вход схемы импульса *Сброс* туннельный диод $ТД_1$ возвращается в исходное состояние и генерация прекращается. Такого рода схемы используются в ядерной спектроскопии и вычислительной технике.

Глава третья

ГЕНЕРАТОРЫ И ФОРМИРОВАТЕЛИ ИМПУЛЬСОВ С ЕМКОСТЬЮ НА ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДАХ

В рассмотренных в предыдущей главе схемах генераторов синдуктивностью роль последней сводилась к выполнению функций элемента колебательного контура, а туннельный диод служил в качестве прибора с отрицательным сопротивлением; одновременно в схемах высокочастотных генераторов использовалась как составной элемент колебательного контура его собственная емкость.

В этой главе будут рассматриваться схемы с емкостью, где туннельный диод играет роль точного порогового устройства, т. е. формирователя импульсов из пилообразного напряжения заряда и разряда конденсатора.

ФОРМИРОВАТЕЛИ ИМПУЛЬСОВ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ ДО 5 мсек

На рис. 20 представлены две схемы, осуществляющие расширение или, при введении дополнительного формирующего узла, задержку входного короткого импульса на заданное время. В обеих схемах в исходном состоянии транзисторы T_1 и T_2 заперты.

Рабочая точка туннельного диода первого генератора находится на начальном участке туннельной ветви вольт-амперной характеристики. Строго говоря, ее положение определяется незначительными токами перехода эмиттер — коллектор запертого транзистора T_1 и коллектор — база транзистора T_2 . При поступлении на вход

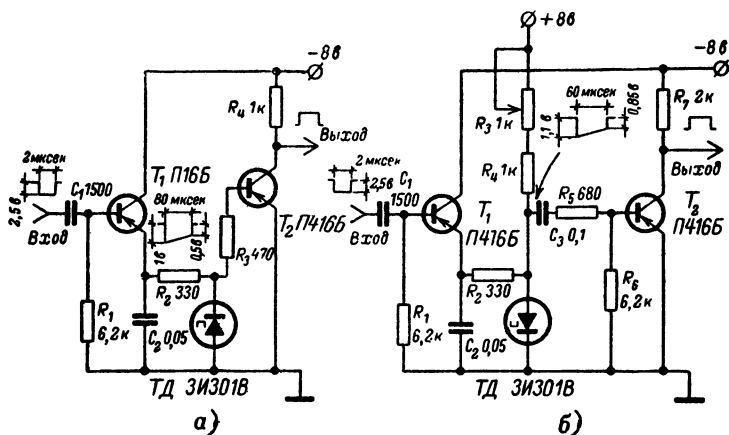


Рис. 20. Схемы формирователя импульсов длительностью до 5 мсек.

схемы отрицательного импульса произвольной формы и амплитуды через транзистор T_1 начинает протекать ток заряда конденсатора C_2 . В процессе заряда рабочая точка туннельного диода начинает перемещаться вверх по туннельной ветви характеристики и при достижении точки с координатами I_1 , U_1 происходит резкий переход в точку с координатами I_1 , U_3 на диффузионной ветви. На туннельном диоде формируется крутой фронт. В реальной схеме с параметрами, указанными на рис. 20, а, при поступлении импульса с амплитудой 2,5 в и длительностью фронта порядка единиц микросекунд фронт импульса на туннельном диоде формируется спустя 0,2 мсек после прихода запускающего импульса. Если к этому времени транзистор T_1 еще не заперся, происходит дальнейшее повышение напряжения на конденсаторе C_2 и подъем рабочей точки диода вверх по диффузионной ветви характеристики.

Повышение напряжения на конденсаторе заканчивается за время 0,7—0,9 мсек, и затем, после прекращения действия входного импульса, начинается процесс разряда конденсатора через туннельный диод и нагрузку — резистор R_3 и промежуток эмиттер — база транзистора T_2 . Рабочая точка диода теперь «скользит» вниз по диффузионной ветви. При подходе к точке «впадины» вольт-амперной характеристики сопротивление диода постепенно повышается

до максимального значения, что способствует замедлению разряда конденсатора.

В точке с координатами U_2, I_2 рабочая точка скачком возвращается на туннельную ветвь. Это приводит к формированию спада импульса. Остаточный доразряд емкости происходит значительно быстрее через низкое сопротивление диода. В результате на коллекторе транзистора T_2 формируется положительный прямоугольный импульс длительностью 80 мксек. Плавная регулировка длительности выходных импульсов может производиться либо изменением сопротивления резистора R_2 в пределах 200—800 ом, что соответствует изменению длительности в пределах 30—110 мксек, либо изменением сопротивления нагрузки (резистором R_3 или резистором параллельно диоду). Эти регулировки нелинейны, так же как регулировка, осуществляемая при дополнительном смещении диода от отдельного источника напряжения.

Скачкообразное изменение длительности импульсов достигается изменением емкости C_2 (зависимость $\tau_n = f(C_2)$ близка к линейной с крутизной 0,2 мкф/сек в диапазоне 1 000—5 000 мксек) или подключением туннельных диодов на разные рабочие токи. Наибольшая величина задержки (около 20—30 мсек) в данной схеме имеет место при $C_2 = 0,5$ мкф, $R_2 = 2$ ком и туннельном диоде типа 30301А (диод был дополнительно смещен в прямом направлении).

Необходимо заметить, что осуществлять удлинение импульсов на время большее, чем 5 мсек, с помощью описанной схемы нецелесообразно, поскольку в этом случае экспоненциальная кривая разряда конденсатора имеет невысокую крутизну и на стабильность схемы оказывает влияние малейшее изменение как пороговых характеристик туннельного диода, так и напряжения питания.

Одним из преимуществ описанной схемы перед большинством аналогичных чисто транзисторных схем является то, что ее время восстановления очень мало. Оно определяется лишь длительностью входного запускающего импульса и временем задержки начала формирования импульса задержки. Если новый запускающий импульс появляется в момент, когда формирование выходного импульса уже закончилось, но конденсатор C_2 еще полностью не разрядился, этот новый импульс лишь дозарядит конденсатор до исходного напряжения, равного с учетом коэффициента передачи каскада на транзисторе T_1 амплитуде входного импульса. Естественно, что входные импульсы должны быть нормализованы по амплитуде и длительности, а период их повторения не должен быть меньше длительности выходного импульса.

Оценку длительности импульса задержки для схемы на рис. 20,а можно производить по следующей формуле:

$$\tau_{\text{д}} = \left(R_2 + \frac{R_{\text{д}} R_{\text{н}}}{R_{\text{д}} + R_{\text{н}}} \right) C_2 \ln \frac{U_c}{U_{\text{д}} \left(\frac{R_2}{R_{\text{д}}} + \frac{R_2}{R_{\text{н}}} + 1 \right)}, \quad (17)$$

где R_2 и C_2 — элементы схемы; $R_{\text{н}}$ — сопротивление нагрузки, включающее сопротивление резистора R_3 и сопротивление промежутка эмиттер — база транзистора T_2 (для простоты расчетов принимаем, что $R_{\text{н}} = R_3$); U_c — напряжение на конденсаторе в момент начала разряда конденсатора (если в качестве транзистора T_1 используется транзистор с большим коэффициентом усиления и длительность входного импульса $\tau_{\text{вх}} > 2$ мксек, то можно принять, что напряже-

ние на конденсаторе равно амплитуде входного запускающего импульса); R_d и U_d — средние значения соответственно активного сопротивления диода и напряжения на нем на участке, где происходит формирование вершины импульса задержки, т. е.

$$U_{\pi} = \frac{U_3 + U_2}{2}; \quad (18)$$

$$R_{\pi} = \frac{R_d \text{ (при } U_2) + R_d \text{ (при } U_3)}{2}. \quad (19)$$

Пример расчета. Для схемы на рис. 20,а с данными элементов: $C_2=0,5$ мкф, $R_2=560$ ом, $R_3=470$ ом; туннельный диод типа 3ИЗ01А с характеристиками на рис. 1. Определить длительность импульса задержки на выходе.

Подставляя в формулы (17)–(19) исходные данные, находим:

$$\tau_{\pi} = \left(560 + \frac{3500 \cdot 470}{3500 + 470} \right) 5 \cdot 10^{-7} \times \\ \times \ln \frac{2,5}{0,8 \left(\frac{560}{3500} + \frac{560}{470} + 1 \right)} = 2 \text{ мсек.}$$

По результатам экспериментальных измерений $\tau_{\pi}=1650$ мксек.

Температурная стабильность генератора задержки определяется в основном температурным дрейфом параметров туннельного диода I_2 и U_2 , коэффициента передачи входного каскада и сопротивления перехода эмиттер — база транзистора T_2 . Исходя из данных испытаний схемы при температуре $20 \pm 10^\circ \text{C}$ изменение длительности импульса задержки не превышает 1%.

Схема, изображенная на рис. 20,б, отличается от рассмотренной в основном тем, что относительно источника запускающих импульсов туннельный диод включен в обратном направлении. Диод предварительно смещен с помощью источника положительного напряжения и рабочая точка его вольт-амперной характеристики находится на диффузионной ветви.

При поступлении входного импульса рабочая точка перемещается на туннельную ветвь, по мере разряда конденсатора движется по ней до достижения вершины и затем возвращается в исходное положение.

Сформированный диодом импульс имеет более пологую вершину, чем в схеме на рис. 20,а. Температурный дрейф длительности задержки генератора незначителен из-за того, что формирование спада происходит на вершине туннельной ветви, т. е. там, где дрейф параметров I_1 , U_1 мал.

Недостатками схемы являются: потребление тока при отсутствии входных импульсов, так как в исходном состоянии туннельный диод возбужден, и необходимость во втором источнике напряжений.

Применение в выходных каскадах схем высокочастотных транзисторов типа П416Б обеспечивает достаточно крутые фронты импульсов. Длительность фронта составляет 40–50 нсек, спада—150–200 нсек. Если длительность входного импульса меньше 2 мксек, то желательно применять транзисторы П416Б и в первых каскадах (вместо П16Б).

Для того чтобы с помощью схем на рис. 20 осуществлять задержку входных коротких импульсов, достаточно дополнить их формирователями коротких импульсов, запускаемых от спада выходного сигнала, аналогично тому, как это сделано в рассматриваемой ниже схеме на рис. 22.

ФОРМИРОВАТЕЛЬ ИМПУЛЬСОВ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ ДО 100 мсек

Устранить недостатки предыдущих схем с точки зрения обеспечения больших стабильных задержек (формирования выходных импульсов большой длительности) можно за счет незначительного усложнения схем, которое заключается в введении буферных каскадов, увеличивающих постоянную времени цепи разряда времязадающего конденсатора.

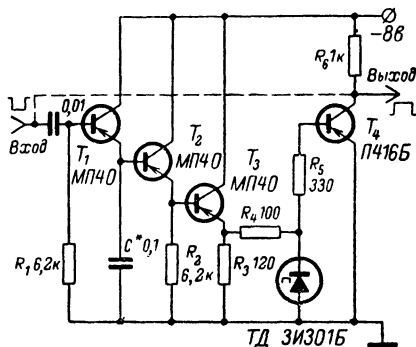


Рис. 21. Схема формирователя импульсов длительностью до 100 мсек.

Дополнительные каскады на транзисторах T_2 и T_3 выполнены по схеме эмиттерных повторителей и, так же как и каскады на транзисторах T_1 и T_2 в схеме на рис. 20, заперты. Как и в предыдущих схемах, туннельный диод выполняет функции порогового устройства.

Схема на рис. 21 может играть также роль преобразователя амплитуды в длительность импульса. При изменении амплитуды запускающих импульсов длительностью 0,3 мсек от 3 до 8 в длительность выходных сигналов меняется от 2 до 30 мсек.

Наряду с этим схема «чувствительна» к длительности запускающих импульсов. При изменении длительности их от 0,1 до 0,5 мсек (при постоянной амплитуде 6 в) длительность импульсов задержки на выходе схемы меняется по почти линейному закону в пределах 5—30 мсек.

Причина указанного явления — инерционность входного каскада, составного эмиттерного повторителя на транзисторах МП40 (T_1 — T_3), приводящая к сильной зависимости коэффициента передачи каскада от длительности входного импульса. Она проявляется при $\tau_{и.вх}$, соизмеримых с τ_{α} транзисторов. При $\tau_{и.вх} > 2$ мсек длительность выходных импульсов почти не зависит от $\tau_{и.вх}$.

При налаживании схемы прежде всего необходимо иметь в виду, что при малых значениях сопротивления резистора $R_4 = 0 \div 20$ ом схема склонна к самовозбуждению на частоте (1—10 Мгц), зависящей в основном от типа используемого туннельного диода и транзистора оконечного каскада.

Перевод схемы в автоколебательный режим может быть также осуществлен соединением зажимов Вход и коллектора транзистора T_4 . При изменении сопротивления резистора R_4 в пределах

50—500 ом частота на зажиме *Выход* такого генератора меняется в интервале 500—50 гц при амплитуде 2—5 в.

Перейдем к рассмотрению практических схем генераторов, базирующихся на использовании рассмотренных схем задержки.

ГЕНЕРАТОР ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ БОЛЬШОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

Основу генератора (рис. 22) составляют два соединенных в «кольцо» уже известных нам формирователя задержанных импульсов, работа которых основана на разряде конденсатора через туннельный диод.

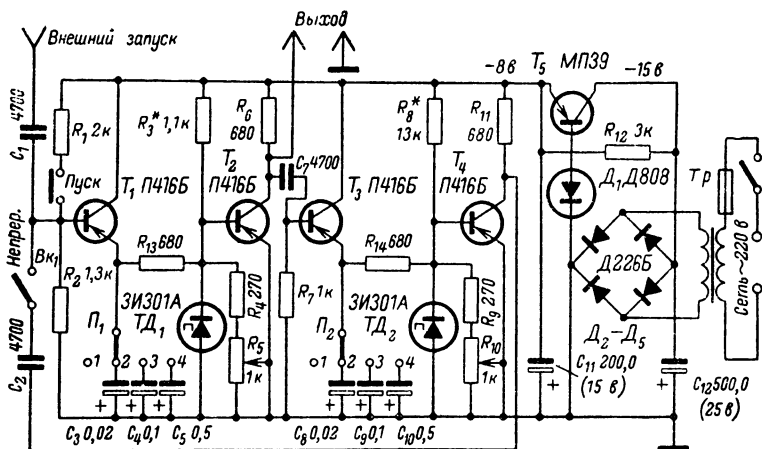


Рис. 22. Схема генератора прямоугольных импульсов большой длительности.

При включении прибора и замыкании тумблера *Вкл*₁ (непрерывная генерация) колебания на выходе схемы отсутствуют, поскольку все транзисторы исходно заперты. Вслед за нажатием кнопки *Пуск* отпирается транзистор *T*₁, происходит заряд одного из времязадающих конденсаторов *C*₃—*C*₅ и формирование с помощью туннельного диода *ТД*₁ фронта импульса. После отпущения кнопки конденсатор начинает разряжаться через диод, на котором образуется импульс задержки. Усиленный по напряжению, этот импульс в положительной полярности с коллектора транзистора *T*₂ поступает через дифференцирующую цепочку *C*₇*R*₇ на базу транзистора *T*₃.

С этого момента и начинается нормальный автоколебательный режим работы прибора. Полученным после дифференцирования спада отрицательным «всплеском» с длительностью на полувысоте около 10—15 мксек запускается второй, совершенно аналогичный генератор задержки, формирующий «импульсы пауз».

В свою очередь после дифференцирования на цепочке *C*₂*R*₂ положительного импульса с коллектора транзистора *T*₄, теперь уже

сформированным по амплитуде и длительности сигналом вновь запускается первый генератор и т. д.

На зажимы *Выход* поступают положительные импульсы с коллектора транзистора T_2 . Пределы регулировок длительности импульсов задержки обеих ячеек совершенно идентичны, что достигается установкой соответствующих начальных смещений диодов с помощью резисторов R_3 и R_8 . Кроме того, введение начального смещения диодов позволяет расширить пределы регулировок в сторону более длинных импульсов.

Изменение частоты и длительности импульсов осуществляется выбором емкости одного из конденсаторов C_3 — C_5 и C_8 — C_{10} (поддиапазоны 35—75, 100—250 и 500—1 500 мксек), а в пределах поддиапазонов — изменением нагрузочного сопротивления цепи разряда R_5 и R_{10} . На первом пределе 15—20 мксек генератор задержки представляет собой эмиттерный повторитель с туннельным диодом в виде нагрузки с пороговой характеристикой. Эти регулировки позволяют изменять скважность генерируемых импульсов в пределах 1 : 100. На внешней нагрузке 1 ком параметры выходных импульсов таковы: амплитуда не менее 6 в, длительность фронта по уровню 0,5 — не менее 30 нсек, спада — не менее 100 нсек, частота повторения 300—3 000 гц, полный интервал регулировки длительности 15—1 500 мсек.

При переводе генератора в ждущий режим работы и подаче на зажим *Внешний запуск* отрицательных импульсов не короче 2 мксек амплитудой 4 в схема выполняет функции расширителя импульсов.

Питание схемы производится от стабилизированного источника напряжением 8 в, собранного на транзисторе T_5 и диоде D_1 . В схеме использован трансформатор питания Tr типа ТВК-70, однако может быть применен любой маломощный трансформатор с вторичным напряжением 10—15 в. Хорошая экономичность прибора (в автоколебательном режиме потребление тока не более 15 ма) позволяет также питать его от батарей.

На рис. 23,а даны фотографии внешнего вида прибора и вида на монтаж (рис. 23,б и в).

Переключатели P_1 и P_2 — малогабаритные типа МГП; резисторы R_5 и R_{10} — проволочные типа ППЗ-12; времязадающие конденсаторы — типа КЛС, МБМ, ЭМ; конденсаторы фильтра C_{11} , C_{12} — типа К50-6. Остальные конденсаторы — типа КЛС, резисторы — типа МЛТ-0,125.

Перед первым включением собранной схемы необходимо отпаять резисторы R_3 и R_8 и установить переменные резисторы R_5 и R_{10} в положение максимального сопротивления. Правильно смонтированная схема при включении прибора и кратковременном нажатии кнопки *Пуск* сразу же начнет функционировать. Далее, после установки переключателей P_1 и P_2 в положение четвертого диапазона, нужно, тщательно подбирая сопротивления резисторов R_3 и R_8 в пределах 9—12 ком, установить максимальное значение длительностей импульсов и пауз. В процессе наладки генератора на втором и третьем диапазонах емкости конденсаторов C_3 , C_4 , C_8 и C_9 могут корректироваться. Длительность импульсов задержки на первом диапазоне во многом определяется коэффициентами усиления каскадов на транзисторах T_1 и T_3 .

Если требуется сдвинуть диапазоны в сторону более коротких импульсов, следует изменить параметры дифференцирующих цепо-

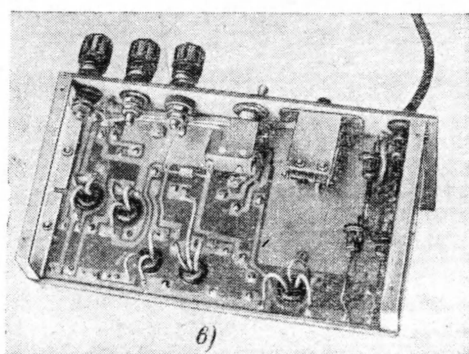
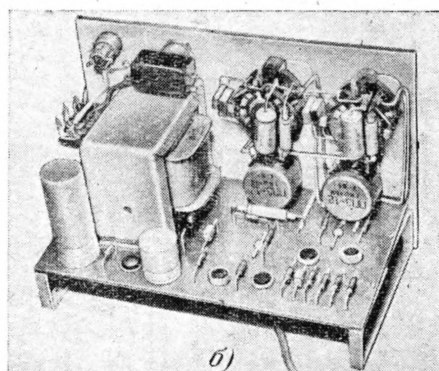
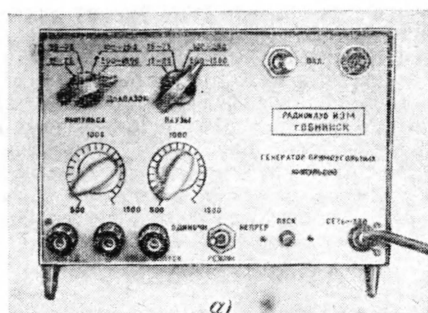


Рис. 23. Конструкция генератора прямоугольных импульсов.

чек C_7R_7 и C_2R_2 . При $C_7=C_2=1\ 000\ \text{пф}$ минимальные длительности составляют 5 мсек.

Градуировка прибора производилась с помощью двухлучевого осциллографа С1-16. Поскольку зависимость между емкостью времязадающих конденсаторов и длительностью сигналов несколько отличается от линейной, оцифрованные отметки шкалы представляют собой среднее значение выходной величины с максимальным разбросом в обе стороны 3—8 и 2—4% в середине шкалы.

Испытания прибора при изменении окружающей температуры в пределах 10—30°С и колебаниях сетевого напряжения 220 В ± ±15% показали, что их влияние пренебрежимо мало.

Прибор смонтирован в корпусе размерами 1500×100×90 мм. Схема выполнена на печатной плате размерами 140×80 мм.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ФОТОГРАФИРОВАНИЯ С ЭКРАНА КИнесКОПА

Устройство, схема которого показана на рис. 24, позволяет синхронизировать начало формирования определенного полукадра или кадра телевизионного изображения с началом движения затвора фотокамеры.

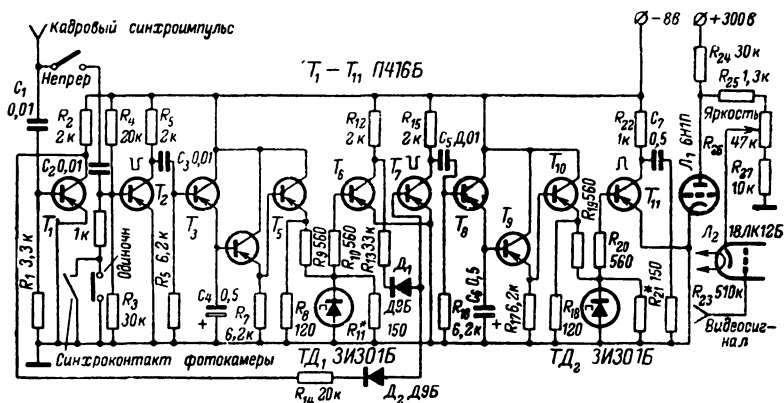


Рис. 24. Принципиальная схема устройства для фотографирования с экрана кинескопа.

Обычно при фотосъемке спортивных и других меняющихся сюжетов с экрана кинескопа приходится уменьшать экспозицию до величины длительности одного полукадра (20 мсек) или кадра (40 мсек). В этом случае на фотоснимке по вертикали могут быть видны межкадровые полосы. Этот недостаток устраняет описываемое устройство.

Перед началом фотографирования кинескоп заперт по катоду положительным потенциалом с анода лампы Л1. Отпирание его происходит ровно на время полукадра или кадра при подаче на сетку лампы Л1 положительного импульса, вырабатываемого с помощью формирователей импульсов (схем задержки) большой длительности.

Схема работает следующим образом. Кадровые синхрои импульсы в произвольной полярности амплитудой 0,5—8 в поступают через дифференцирующую цепочку C_1R_1 на базу транзистора T_1 . Транзистор работает в ключевом режиме и поэтому нормализует сигнал по амплитуде и форме. Выходной сигнал поступает на диодно-транзисторную схему совпадений (элементы D_1 , D_2 , T_7).

Транзистор T_2 исходно отперт до насыщения и при замыкании синхроконтakta запирается, образуя на коллекторе крутой фронт. После дифференцирования цепочкой C_3R_6 , импульс фронта поступает на запуск схемы задержки на транзисторах T_3 — T_6 и диоде TD_1 , формирующего на коллекторе транзистора T_6 импульс длительностью 20 мсек в положительной полярности.

В исходном состоянии транзистор T_7 отперт отрицательными потенциалами с коллекторов транзисторов T_1 и T_6 и запирается только при одновременном поступлении «импульса полукадра» и кадрового синхрои импульса.

Далее этот импульс поступает на запуск аналогичного формирователя импульсов. Длительность последних также равна периоду полукадра (при $C=0,5$ мкф) или полного кадра (при $C=1$ —2 мкф) телевизионного изображения. Точная подстройка производится выбором сопротивления резистора R_{21} . На коллекторе транзистора T_{11} формируется необходимый импульс, засвечивающий экран кинескопа на заданное время.

При необходимости постоянного наблюдения за телевизионным изображением замыкается переключатель *Непрер.* Этим обеспечивается непрерывное поступление синхрои импульсов и постоянная засветка экрана. Кнопкой *Одиночн.* имитируется замыкание синхроконтakta.

Наладка схемы проста, поскольку все транзисторы T_1 — T_{11} работают в ключевом режиме, и заключается в подстройке генераторов задержки.

В ждущем режиме схема потребляет не более 8 ма, в режиме постоянной засветки около 25 ма.

Несколько видоизменив оконечные каскады устройства, таким же путем можно управлять стандартными кинескопами, у которых регулировка яркости производится в цепи модулятора.

ГЕНЕРАТОР КОРОТКИХ ИМПУЛЬСОВ

Еще одно интересное применение разрядных цепочек с емкостью и туннельным диодом имеет место в схеме генератора коротких импульсов, показанной на рис. 25. Схема по своему построению напоминает описанные ранее генераторы на большие задержки. Основное отличие — отсутствие электронного ключа в цепи заряда конденсатора и введение цепи ее ускоренного разряда.

В начальный момент при включении напряжения питания транзисторы T_1 — T_3 заперты. Отрицательным потенциалом на коллекторе транзистора T_3 заперт также диод D_1 . Рабочая точка туннельного диода находится на начальном участке туннельной ветви. По мере заряда одного из конденсаторов C_1 — C_4 через резистор R_1 напряжение на конденсаторе повышается, и это нарастание передается с помощью эмиттерных повторителей на транзисторах T_1 и T_2 на туннельный диод. При достижении рабочей точки максимума на туннельной ветви происходит быстрый переброс на диффузионную ветвь и формирование фронта импульса. Транзистор T_4 усилитель-

ного каскада отпирается до насыщения. Поскольку запирающее напряжение на аноде диода D_1 падает до нуля, последний отпирается и конденсаторы $C_1—C_4$ разряжаются через диод и переход эмиттер — коллектор транзистора T_3 . Туннельный диод вновь возвращается в исходное состояние, запирая тем самым транзистор T_3 . Вновь начинает заряжаться времязадающий конденсатор и т. д.

Скорость заряда конденсатора обуславливается при данном напряжении питания и данной емкости конденсатора прежде всего со-

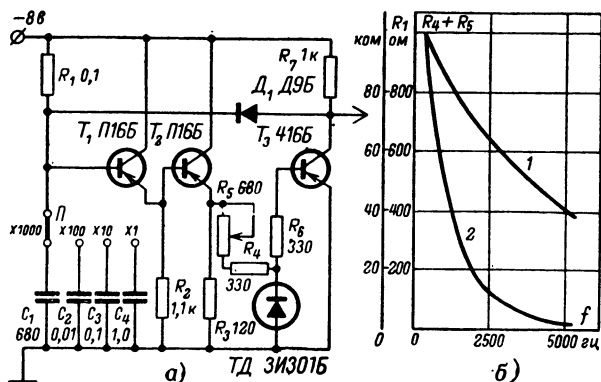


Рис. 25. Схема генератора коротких импульсов.

противлением резистора R_1 . Скорость разряда конденсатора зависит от прямого сопротивления диода D_1 и сопротивления промежутка коллектор — эмиттер транзистора T_3 .

Экспериментально полученная зависимость частоты на выходе генератора от сопротивления резистора R_1 (при $R_4 + R_5 = 1 \text{ ком}$) представлена на графике рис. 25,б (кривая 2). Резко нелинейный характер этой зависимости в диапазоне частот с кратностью 1:100 не позволяет получить удобные и простые регулировки. Более линейная зависимость существует между частотой и емкостью конденсатора $C_1—C_4$ и сопротивлением резистора R_5 , регулирующего напряжение на туннельном диоде (кривая 1).

В схеме на рис. 25,а ступенчатая регулировка осуществляется подключением конденсаторов $C_1—C_4$, плавная — с помощью резистора R_7 в поддиапазонах: 50—700 гц, 500—7 000 гц, 5—70 кГц, 50—500 кгц.

Недостатком прибора является изменение длительностей выходных импульсов на каждом диапазоне: на первом — в интервале от 0,5 до 0,7, на втором — 1—1,5, на третьем — 3—5 и на четвертом — 120—150 мксек.

Длительность фронта выходных импульсов составляет 0,05, а спада 0,1—0,15 мксек. Максимальное отклонение действительной частоты от значений оцифрованных меток шкалы плавной регулировки для всех диапазонов, кроме четвертого, не превышает 5%. На четвертом диапазоне градуировка индивидуальная. Температурный дрейф частоты не более 0,1 %/град.

В качестве транзисторов T_1 , T_2 рекомендуется выбирать транзисторы с большими коэффициентами усиления и меньшей инерционностью, например типа П16Б, МП42Б, П416Б и др., вместо диода Д9Б с успехом используются диоды Д18, Д20 или быстродействующие Д311, 2Д503 и др.

Налаживание прибора. Перед первым включением прибора необходимо вместо резисторов R_4 и R_5 установить переменный резистор сопротивлением 1,5—2 ком, полностью введя его. В процессе наладки желательно вольтметром с высокоомным входом или осциллографом контролировать напряжение на конденсаторах C_1 — C_4 и туннельном диоде. Включив прибор и плавно уменьшая сопротивление реостата, нужно достичь точки появления генерации и зафиксировать значение сопротивления. При дальнейшем уменьшении сопротивления частота колебаний будет возрастать и, наконец, наступит момент, когда туннельный диод полностью перейдет в возбужденное состояние. Иногда при малых (около десятков ом) сопротивлениях в цепи туннельного диода в схеме может возникнуть паразитная генерация на частоте около 5 Мгц. В этом случае необходимо для каждого поддиапазона зафиксировать критическое значение сопротивления. Сопротивление резистора R_4 должно быть больше этого сопротивления.

Фотография внешнего вида генератора коротких импульсов дана на рис. 26.

Принципы, заложенные в основу схемы генератора коротких импульсов, могут стать основой для конструирования целого ряда радиотехнических устройств: преобразователей постоянного тока и напряжения, а также емкости и сопротивления в частоту, реле времени и т. п.

Некоторые из них будут рассмотрены ниже.

ГЕНЕРАТОР «ПАЧЕК» ИМПУЛЬСОВ

При разработке различного рода устройств вычислительной техники находят применение генераторы «пачек» импульсов или генераторы «цуга». Генератор коротких импульсов по схеме на рис. 25 может быть использован для генерирования «пачек» импульсов. Модифицированная схема такого генератора представлена на рис. 27,а.

При замыкании переключателя $П_1$ транзистор T_1 отпирается до насыщения, шунтируя тем самым времязадающий конденсатор C_x по цепи эмиттер — коллектор T_1 , диод D_2 . Колебания в схеме отсутствуют. Если же на базу транзистора поступит импульс в положи-

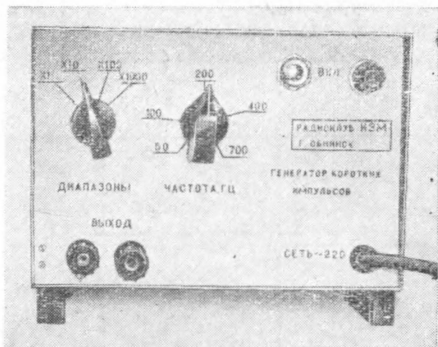


Рис. 26. Общий вид генератора коротких импульсов.

тельной полярности, транзистор запирается и в течение времени действия входного импульса на выходе схемы появляются импульсы, число которых пропорционально длительности поступившего импульса.

На рис. 27,6 показаны осциллограммы импульсов в различных участках схемы. За счет ряда схемных изменений: использование в качестве транзисторов T_2 и T_3 высокочастотных транзисторов типа П416 удалось значительно расширить диапазон рабочих частот генератора. При $R_{зар}=82 \text{ ком}$, $C_x=100 \text{ пф}$ — 100 мкф , $R_{см}=650 \text{ ом}$ полный диапазон изменения периода колебаний прямоугольных импульсов на выходе схемы составляет от $0,5 \text{ мксек}$ до 12 сек .

Таблица 3

Диапазон	C_x	$R_{см}, \text{ ом}$		
		30	60	200
1	2	3	4	5
1	100 пф	0,5	0,9	4
2	1 000 пф	1,7	8	25
3	0,01 мкф	25	95	250
4	0,1 мкф	60	450	2 500
5	1 мкф	400	4 000	25 000
6	10 мкф	4 000	20 000	70 000
7	100 мкф	70 000	0,2 сек	0,6 сек

Продолжение табл. 3

Диапазон	$R_{см}, \text{ ом}$			Длительность импульса, мксек
	400	600	650	
1	6	7	8	9
1	10	25	55	0,3—0,45
2	75	200	280	0,5—0,7
3	750	1 700	2 500	0,8—1,0
4	7 000	17 000	25 000	2—4
5	65 000	0,16 сек	0,22 сек	10—30
6	0,2 сек	1 сек	1,5 сек	30—500
7	1,5 сек	8 сек	12 сек	700—4 000

Регулировочные характеристики схемы отражены в табл. 3, где приведены значения периода следования импульсов (величины без подписей даны в микросекундах) при разных значениях C_x и $R_{см}$.

Здесь же даны интервалы изменения длительности импульсов на различных диапазонах работы генератора.

Если для каждого фиксированного значения емкости строить с помощью табл. 3 график зависимости частоты колебаний от сопротивления $R_{см}$, можно заметить, что искомая кривая состоит из двух сравнительно линейных участков. Первый участок с высокой кру-

тизмой наблюдается при $R_{с\text{м}}=30\div 100$ ом, второй участок с малой крутизной и хорошей линейностью при $R_{с\text{м}}=100\div 600$ ом. Это обстоятельство можно использовать для построения генераторов с линейной шкалой, но с несколько заниженной степенью перекрытия по частоте.

Таблица 4

$R_{\text{расп}}, \text{ом}$	0	100	200	500	1 000	3 000	5 000
$T, \text{мсек}$	2	7,5	9	10	12	20	40
$\tau, \text{мксек}$	35	200	400	870	2 000	8 000	27 000

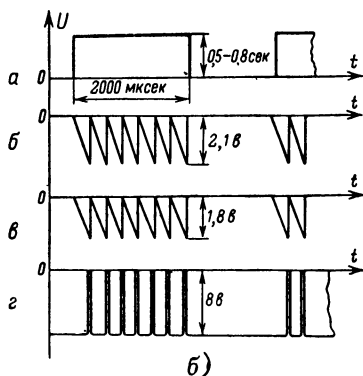
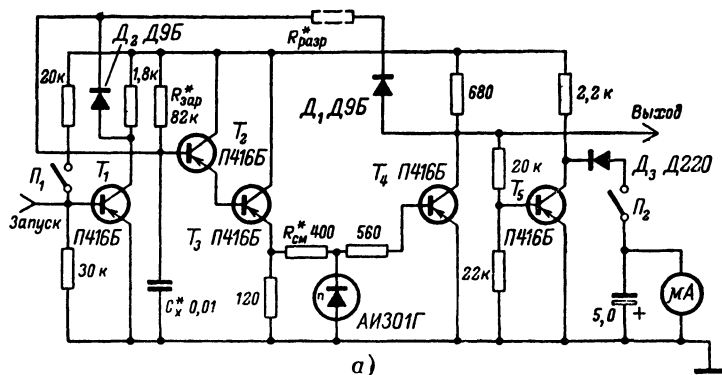


Рис. 27. Схема генератора «пачек» импульсов.

a — принципиальная схема; b — диаграммы импульсов на базе транзистора T_1 (a); на конденсаторе C_x (b); на эмиттере транзистора T_3 ($в$); на коллекторе транзистора T_4 ($г$).

В табл. 4 приведены значения длительности импульсов τ и периода следований импульсов T для различных сопротивлений резистора $R_{\text{разр}}$ в цепи разряда времязадающего конденсатора (при $C_x = 10 \text{ мкф}$; $R_{\text{зар}} = 84 \text{ ком}$, $R_{\text{см}} = 40 \text{ ом}$).

Как видно из табл. 4, при увеличении сопротивления разрядной цепи вместе с изменением длительности импульсов по закону,

близкому к линейному, меняется в широких пределах и период колебаний. Это снижает универсальность схемы.

Тем не менее простота и стабильность схемы, возможность быстрой перестройки частоты заполняющих импульсов в широких пределах и, главное, пренебрежимо малое время восстановления схемы при работе в ждущем режиме открывает широкие возможности для практического применения.

Еще одним примером практического применения является использование схемы на рис. 27 в автоколебательном режиме для испытания туннельных диодов. Для этого используется тот факт, что при включении туннельных диодов на меньшие токи соответственно увеличивается частота колебаний. Например, при $R_{зар}=82 \text{ ком}$, $R_{см}=400 \text{ ом}$, $C_x=0,01 \text{ мкф}$ и включении диодов АИ301А, АИ301Б и АИ301Г частоты на выходе схемы, будут, соответственно, составлять $12,5 \pm 1 \text{ кГц}$, $3\,700 \pm 300 \text{ Гц}$, $1\,300 \pm 200 \text{ Гц}$.

Измерение частоты можно производить с помощью внешнего измерительного прибора или с помощью дополнительного интенсиметра на транзисторе T_4 с выходом на стрелочный прибор.

Если туннельный диод имеет обрыв, стрелочный прибор будет резко «зашкаливать», при коротком замыкании стрелка прибора установится на нуль. В этом случае во избежание перегрева транзистора T_3 необходимо немедленно выключить генератор.

При разработке различного рода развертывающих устройств полезным может оказаться то обстоятельство, что в некоторых узлах схемы на рис. 27 формируется достаточно линейное пилообразное напряжение при изменении периода колебаний в пределах от 0,5 мксек до 10 мсек. Для улучшения линейности во всем диапазоне частот рекомендуется питать зарядную цепочку $R_{зар}C_x$ повышенным напряжением.

О возможности использования описываемой схемы как преобразователя постоянного напряжения в частоту импульсов говорит существование достаточно линейной зависимости между напряжением питания зарядной цепочки и периодом колебаний импульсов на выходе. При $R_{зар}=82 \text{ ком}$, $R_{см}=200 \text{ ом}$, $C_x=0,01 \text{ мкф}$ крутизна преобразователя составляет 13% относительного изменения периода на каждый вольт изменения преобразуемого напряжения в диапазоне 5—10 в; при уменьшении C_x до 0,001 мкф крутизна равна 22%/в. Неравномерность крутизны не превышает $\pm 1-3\%$.

КОМБИНИРОВАННЫЕ СХЕМЫ НА ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДАХ

Описанные ниже устройства включают в себя как схемы генераторов с индуктивностью, так и схемы генераторов задержки с емкостными разрядными цепочками.

Генератор импульсов по схеме на рис. 28 обеспечивает формирование одиночных или синхронизированных внешним сигналом регулируемых по длительности «пачек» импульсов. Длительность «заполняющих» импульсов на выходе постоянна, но в широких пределах может меняться длительность пауз между ними.

При замыкании кнопки *Разовый пуск* запирается транзистор T_1 и импульсом, полученным от дифференцирования фронта сигнала с коллектора этого транзистора, запускается генератор задержки на туннельном диоде $ТД_1$. Длительность импульса задержки регулируется в пределах 200—2000 мксек с помощью резистора в цепи смещения диода. На туннельный диод $ТД_2$ ждущего генератора

с индуктивностью подаются с коллектора транзистора T_4 инверторного каскада запускающие импульсы в отрицательной полярности.

Вершина их после прохождения дифференцирующей цепочки становится несколько пологой, подобно тому как показано на диаграммах рис. 17,б. По мере нарастания отрицательного потенциала на диоде, частота импульсов генератора растет. Одновременно изменяется и длительность импульсов.

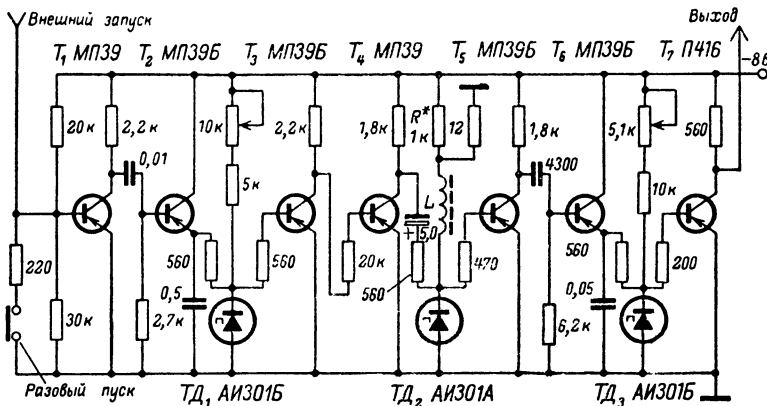


Рис. 28. Схема генератора импульсов с переменным периодом.

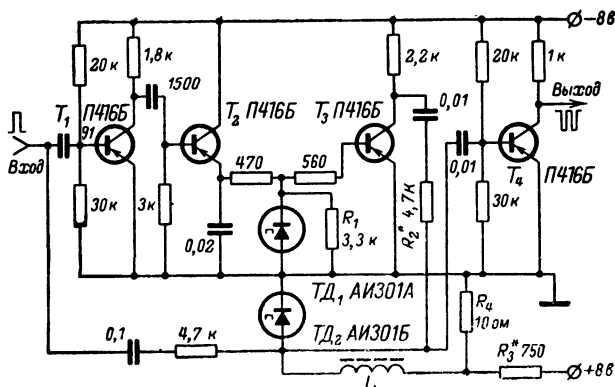


Рис. 29. Схема генератора «цуга» с ограничением.

С помощью генератора задержки на диоде $TД_3$, который запускается спадом импульса на коллекторе транзистора T_5 , осуществляется нормализация импульсов по длительности в пределах 100—300 мксек. С выхода схемы снимаются «пачки» положительных импульсов постоянной длительности.

Схема на рис. 29 может выполнять функции генератора «цуга» с одновременным ограничением числа импульсов в «цуге».

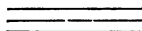
Основой схемы является ждущий генератор на частоту 250 кГц (элементы $ТД_2$, L , R_3 и R_4), который возбуждается при одновременном появлении на аноде диода $ТД_2$ входного, подлежащего квантованию импульса и положительного импульса со схемы расширения (с коллектора транзистора T_3), где вырабатывается сигнал ограничения максимального количества импульсов в «пачке».

Задача ограничения предельного числа импульсов в «пачке» может иметь место при разработке схем кольцевого распределения импульсов. Данная схема пригодна для работы совместно с восьмиканальным распределением. Поскольку период импульсов в «цуге» равен 4 мксек, длительность «запрещающего» сигнала выбрана равной $8 \times 4 = 32$ мксек, т. е. все входные импульсы с длительностью более 32 мксек будут выражаться на выходе «цугом» из восьми импульсов.

«Запрещающие» сигналы формируются следующим образом. Каскад на транзисторе T_1 усиливает, нормализует и инвертирует импульсы длительностью 1—2 мксек, полученные при дифференцировании переднего фронта входных положительных импульсов. Расширитель импульсов на диоде $ТД_1$ и транзисторах T_2 и T_3 аналогичен описанному на стр. 29. Он формирует импульсы «запрета» в ответ на приход каждого анализируемого импульса.

Настройка режимов генератора на диоде $ТД_2$ осуществляется подбором сопротивлений резисторов R_2 и R_3 . Каскад на транзисторе T_4 является усилителем выходных импульсов «цуга».

Данные катушки L : восемь витков провода ПЭЛШО 0,31 на кольцо из феррита марки 2000НМ размерами $10 \times 6 \times 5$ мм.



ЛИТЕРАТУРА

Р ж е в к и н К. С., Туннельные диоды, М., «Энергия», 1962 (Массовая радиобиблиотека. Вып. 452).

Г о р ю н о в Н. Н., Кузнецов А. Ф., Экслер А. А., Схемы на туннельных диодах, М., «Энергия», 1965 (Массовая радиобиблиотека. Вып. 568).

Я н ч у к Е. В., Туннельные диоды в приемно-усилительных устройствах, М., «Энергия», 1967 (Массовая радиобиблиотека. Вып. 628).

И в а н о в А. А., Колпаков И. Ф., Тимохин А. А., Применение туннельных диодов в приборах ядерной физики, М., Атомиздат, 1967.

М о р у г и н А. А., Импульсные схемы на туннельных диодах, М., «Советское радио», 1967.

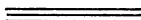
Ч ж о у В. Ф., Принципы построения схем на туннельных диодах, «Мир», 1966.

С м и р н о в В. В., Выделение телевизионных кадров с регулированием размеров изображения. «Техника кино и телевидения», 1968, № 10.

Журнал «Радио», 1965, № 1 и 2; 1968, № 6 и 8.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава первая. Общие сведения о туннельных диодах .	4
Основные характеристики туннельных диодов . . .	4
Контроль статических параметров туннельных диодов .	5
Монтаж и эксплуатация туннельных диодов	7
Особенности генераторных устройств на туннельных диодах	7
Глава вторая. Генераторы и формирователи импульсов с индуктивностью на туннельных диодах	10
Пробники на туннельных диодах	16
Генератор периодических полей	21
Пробники с двухконтурным генератором	23
Перестройка длительности и частоты следования импульсов генераторов	25
Генератор импульсов переменной длительности . . .	25
Генератор качающейся частоты	27
Другие применения генераторов с индуктивностью . .	27
Глава третья. Генераторы и формирователи импульсов с емкостью на туннельных диодах	28
Формирователи импульсов длительностью до 5 мсек .	29
Формирователь импульсов длительностью до 100 мсек .	32
Генератор прямоугольных импульсов большой длительности	33
Устройство для фотографирования с экрана кинескопа .	36
Генератор коротких импульсов	37
Генератор «пачек» импульсов	39
Комбинированные схемы на туннельных диодах . . .	42
Литература	45



ВНИМАНИЮ РАДИОЛЮБИТЕЛЕЙ

На складе Издательства имеется справочник А. Г. Соболевского «Тестеры и авометры», Массовая радиобиблиотека, Вып. 479, 40 стр. с илл., ц. 9 коп.

Справочник содержит основные сведения о работе с тестерами и авометрами — комбинированными многопредельными приборами, предназначенными для измерения тока, напряжения и сопротивления. В нем указаны электрические данные приборов, наиболее распространенных в практике радиолюбителей, приведены принципиальные схемы этих приборов и даны рисунки, поясняющие включение приборов при различных измерениях.

Справочник предназначен для широкого круга радиолюбителей.

Заказы на справочник просьба направлять по адресу: Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10. Издательство «Энергия», Отдел сбыта.

Книги высылаются наложенным платежом (без задатка).

Владимир Владимирович Смирнов
ГЕНЕРАТОРЫ НА ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДАХ
(практические схемы)

Редактор *А. А. Экслер*
Обложка художника *А. А. Иванова*
Технический редактор *Л. М. Кузнецова*
Корректор *Е. В. Житомирская*

Сдано в набор 1/IX 1970 г.	Подписано к печати 6/VIII 1971 г.	Т-13344
Формат 84×109 ¹ / ₃₂		Бумага типографская № 2
Усл. печ. л. 2,52		Уч-изд. л. 3,02
Тираж 35 000 экз.	Цена 13 коп.	Зак. 1365

Издательство „Энергия“. Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Шлюзовая наб., 10.

Цена 13 коп.